



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: “DISEÑO CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN
EQUIPO INDUSTRIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DENSIDAD EN
LISTONES DE MADERA DE BALSA”**

**AUTOR: ROMERO BECERRA, FRANCISCO XAVIER
TAPIA CASTILLO, PAULO GABRIEL**

DIRECTOR: ING. GÓMEZ REYES, ALEJANDRO PAÚL

SANGOLQUÍ

2019



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*DISEÑO CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO INDUSTRIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DENSIDAD EN LISTONES DE MADERA DE Balsa*", fue realizado en su totalidad por Romero Becerra Francisco Xavier y Tapia Castillo Paulo Gabriel, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 01 de Febrero del 2019


Ing. Alejandro Paul Gómez Reyes
DIRECTOR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros ROMERO BECERRA FRANCISCO XAVIER y TAPIA CASTILLO PAULO GABRIEL, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO INDUSTRIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DENSIDAD EN LISTONES DE MADERA DE BALSA", es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

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

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 01 de Febrero del 2019

Francisco Xavier Romero Becerra
Cedula N° 1718153750

Paulo Gabriel Tapia Castillo
Cedula N° 1726239336



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros ROMERO BECERRA FRANCISCO XAVIER y TAPIA CASTILLO PAULO GABRIEL, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación "DISEÑO CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO INDUSTRIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DENSIDAD EN LISTONES DE MADERA DE Balsa", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad

Sangolquí, 01 de Febrero del 2019

Francisco Xavier Romero Becerra
Cedula N ° 1718153750

Paulo Gabriel Tapia Castillo
Cedula N ° 1726239336

DEDICATORIA

A mi Familia, por el apoyo durante estos años

A mis Compañeros, por ser un pilar en los momentos complicados de la Carrera.

A mis Amigos, que siempre me daban ánimos de seguir adelante.

A Mí, por la constancia y fortaleza mostrada hasta llegar al objetivo.

Paulo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis principalmente a la memoria de mi padre Basilio Romero que con su ejemplo me enseñó el valor de la constancia, la alegría, el aprender y el hacerse a sí mismo. La fuerza que demostró durante toda su vida me dio una nueva apreciación y rumbo en la mía que aún conserva su sonrisa, para continuar.

A mis cuatro guerreras indomables que con su apoyo, voluntad y decisión supieron sacarme de a poco adelante, sin dudar un instante. A mi madre Nancy Becerra por el esfuerzo, dedicación, paciencia, por su confianza y por qué aún sin ser necesario vela con esmero cada paso en mi vida. A mi hermana Erika Romero cuyo apoyo y comprensión me dieron un soporte firme en el cual levantarme. A mi pareja Evelyn Núñez que con paciencia y mucho amor confió en mí y me mantuvo soñando entre adversidades. A mi tía Morvila Becerra que me ayudo y estuvo ahí cuando estaba perdido.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por apoyarme cuando más los necesito, por extender su mano en momentos difíciles sin esperar nada a cambio y por todas las risas que compartimos juntos que aportaron gran valor a mi carrera enseñándome más de lo que ellos se imaginan.

Francisco

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, amigos, compañeros por el apoyo mostrado durante toda esta etapa de formación, por ser un pilar de fortaleza en todo momento en este tiempo.

Al Ing. Alejandro Gómez por su ayuda en todos los aspectos, durante la realización de este proyecto.

A la Empresa “Gandara Engineering”, por la confianza brindada, además del financiamiento para la realización de este proyecto, ya que pudimos implementar una máquina automatizada que soluciona los requerimientos establecidos. Mostrando así al potencial desarrollo que se puede llegar a tener en el País por medio de la Automatización Industrial.

AGRADECIMIENTO

En estas líneas quiero agradecer a mi familia y pareja cuya confianza, paciencia y amor me acompañaron durante todos estos años. Gracias, por llenarme de alegría todos estos días y especialmente a mi Mamá cuya constancia, amor, entrega, voluntad y valor me ha brindado una vida digna y un camino seguro donde apoyarme.

A todos mis amigos, vecinos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.

ÍNDICE

CARÁTULA	
CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS:.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS:	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del Problema.....	3
1.3 Área de Influencia.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Justificación e Importancia	5
1.6 Alcance del Proyecto.....	6
1.6.1 Componentes mecánicos.....	7
1.6.1.1 Estructura de soporte	7
1.6.1.2 Tablero de Control	7
1.6.1.3 Módulo de Pesaje.....	8
1.6.2 Componentes electrónicos/eléctricos.....	8
1.6.2.1 Sensores	8
1.6.2.2 PLC LOGO.....	9
1.6.2.3 CELDA DE CARGA:	9
1.6.2.4 TRANSMISOR DE SEÑAL PARA LA CELDA DE CARGA.....	9

1.6.3	Componentes del Sistema de Control.....	10
1.6.3.1	Unidad de control	10
1.6.3.2	Interfaz de control y monitoreo (HMI)	10
CAPÍTULO II.....		11
MARCO TEÓRICO.....		11
2.1	Conceptos de la Densidad.....	11
2.2	Madera de balsa.....	12
2.3	Propiedades de la Madera de Balsa.....	13
2.3.1	Estructura y Funciones de la Madera.....	14
2.3.2	Tipos de Madera	15
2.3.3	Propiedades Mecánicas	15
2.3.3.1	Relación Madera-Humedad	17
2.3.3.2	Propiedades Elásticas.....	17
2.3.3.3	Propiedades de Resistencias comunes	18
2.3.3.4	Propiedades Menos Comunes	19
2.4	Maquinaria que mide la densidad	20
2.4.1	Densidad para control de calidad	20
2.4.2	El pesaje exacto es fundamental.....	21
2.5	Industria Maderera en el País.....	22
2.5.1	Aplicaciones	25
2.6	Sensores en la Industria	26
CAPÍTULO III.....		27
DISEÑO MECATRÓNICO		27
3.1	Metodología del Diseño	27
3.1.1	Requerimientos	28
3.1.2	Diseño del Sistema	28
3.1.3	Diseño Específico.....	28
3.1.4	Integración del Sistema	29
3.1.5	Verificación de las propiedades.....	29
3.1.6	Modelado y Análisis de Modelos	29
3.1.7	Producto	29

3.2 Diseño del Subsistema Mecánico.....	31
3.2.1 Requerimientos	31
3.2.2 Diseño	31
3.2.2.1 Selección de Materiales	42
3.2.3 Materiales.....	74
3.3 Diseño del Subsistema Electrónico	75
3.3.1 Requerimientos	75
3.3.2 Diseño	75
3.3.3 Materiales.....	87
3.4 Diseño del Subsistema de Control	87
3.4.1 Requerimientos	87
3.4.2 Diseño	87
3.4.3 Materiales.....	95
3.5 Integración del Sistema.....	95
3.6 Verificación del Sistema integrado	96
3.7 Análisis del Modelo Matemático	97
3.8 Equipo Industrial para la Medición de la Densidad	97
CAPÍTULO IV	98
IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	98
4.1 Implementación	98
4.1.1 Implementación Mecánica:.....	98
4.1.2 Implementación Electrónica	102
4.1.2.1 Etapa de Potencia.....	103
4.1.2.2 Etapa de Control	104
4.2 Análisis de Resultados	106
CAPÍTULO V	119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
5.1 CONCLUSIONES	119
5.2 RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	123

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. <i>Propiedades Mecánicas de los Materiales Seleccionados</i>	43
Tabla 2. <i>Porcentaje de Importancia de Parámetros para la Estructura Base</i>	45
Tabla 3. <i>Selección de Material</i>	46
Tabla 4. <i>Porcentaje de Importancia de Parámetros para el Brazo-Apoyo</i>	57
Tabla 5. <i>Selección de Material</i>	58
Tabla 6. <i>Procesos de Manufactura Realizados</i>	74
Tabla 7. <i>Porcentaje de Importancia de Parámetros para Sensor de Distancia</i>	80
Tabla 8. <i>Selección del Sensor de Distancia</i>	81
Tabla 9. <i>Datos Técnicos</i>	82
Tabla 10. <i>Datos Técnicos</i>	83
Tabla 11. <i>Porcentaje de Importancia de Parámetros para Transmisor de Peso</i>	84
Tabla 12. <i>Selección del Transmisor de Peso</i>	85
Tabla 13. <i>Datos Técnicos</i>	86
Tabla 14. <i>Porcentaje de Importancia de Parámetros para el PLC</i>	88
Tabla 15. <i>Selección de la Unidad de Control Programable</i>	89
Tabla 16. <i>Características TDE Logo</i>	90
Tabla 17. <i>Módulo de Pesaje</i>	99

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Microestructura de la Madera de Balsa	2
Figura 2. Elementos utilizados en la Medición de la Densidad	22
Figura 3. Aplicaciones de la Madera de Balsa	26
Figura 4. Metodología del Diseño en V	27
Figura 5. Esquema del Equipo a Implementarse	31
Figura 6. DCL del Subsistema Mecánico	32
Figura 7. Diagrama de Esfuerzos	35
Figura 8. Diagrama Cuerpo Libre Base	38
Figura 9. Representación de los Esfuerzos	40
Figura 10. Propiedades mecánicas de los metales más comunes en ingeniería.....	42
Figura 11. Procesos de Maquinado y Soldadura de Metales y Aleaciones	44
Figura 12. Área de Trabajo	47
Figura 13. Forma de la Base	48
Figura 14. Forma de la Base Cuadrada.....	49
Figura 15. Forma de la Base Redonda	49
Figura 16. Estructura Base	50
Figura 17. Diagrama Cuerpo Libre de la Estructura Base	50
Figura 18. Valores Medios de Coeficientes de Fricción	53
Figura 19. Área de Trabajo de los Antideslizantes	54
Figura 20. Elastómeros.....	55
Figura 21. Dureza Brinell de los Materiales	56
Figura 22. Área de Trabajo Brazo-Apoyo	59
Figura 23. Forma del Brazo-Apoyo.....	60
Figura 24. Diagrama de Cuerpo Libre Brazo-Apoyo.....	61
Figura 25. Valores de Par-Apriete de los Tornillos Comerciales.....	63
Figura 26. Análisis de Esfuerzos del Brazo Soporte.....	64
Figura 27. Paralelismo entre la base y el brazo.....	66
Figura 28. Módulo de Pesaje.....	67
Figura 29. Análisis de Esfuerzos del Módulo de Pesaje	69
Figura 30. Elementos Antideslizantes Implementados	71
Figura 31. Implementación de Elastómeros.....	71
Figura 32. Proceso de Torneado	73
Figura 33. Proceso de Soldadura	73
Figura 34. Tipos de Cables AWG	78
Figura 35. Sensor Ultrasónico	82
Figura 36. Celda de Carga Mavin NA1	83
Figura 37. Transmisor de Peso.....	86
Figura 38. HMI TDE Logo	90
Figura 39. Esquema General del Procesamiento de la Información.....	92

Figura 40. Topología de Red	94
Figura 41. Integración del Sistema	96
Figura 42. Módulo de Pesaje	99
Figura 43. Brazo Soporte	100
Figura 44. Subsistema Mecánico Integrado.....	101
Figura 45. Tablero de Control	103
Figura 46. Tablero de Control Interno.....	104
Figura 47. Sistema Electrónico integrado a la unidad de control	105
Figura 48. Equipo Industrial para la Medición de la Densidad.....	106
Figura 49. Grafica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa	110
Figura 50. Gráfica del Error a lo largo de las Medidas en los Listones de Madera.....	110
Figura 51. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet.....	111
Figura 52. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa	112
Figura 53. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa.....	112
Figura 54. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet.....	113
Figura 55. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa	114
Figura 56. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa.....	114
Figura 57. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet.....	115
Figura 58. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa	116
Figura 59. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa.....	117
Figura 60. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet.....	118

RESUMEN

A continuación, se presenta una solución de semi-automatización para una problemática que se generó en un aserradero mediano dedicado a la exportación de la madera de balsa, como procedimiento inicial para la medición de la densidad se basa a través de tres operadores que utilizando elementos de medida (flexómetro y balanza) logran obtener el volumen y peso respectivamente de cada listón de madera de balsa para posteriormente operarlo en un software de la empresa y marcarlo con el valor de la densidad establecida, debido a esta metodología se genera un cuello de botella en el proceso de la planta que se dedica a la exportación de listones de madera de balsa, como una solución se tiene una propuesta semiautomática basada en sensores de peso y distancia, unidades de control programables que conjuntamente posea una estructura mecánica robusta que garantice el correcto funcionamiento en el proceso para la medición de la densidad en listones de madera de balsa, llegando a optimizar (reduciendo la duración del proceso actual que son unos 8 segundos por listón en promedio) los tiempos de medida de los listones con precisión, exactitud y que no sufra ningún tipo de afectación por el entorno de trabajo (polvo y arcilla).

PALABRAS CLAVES:

- **MEDICIÓN DE LA DENSIDAD**
- **EQUIPO INDUSTRIAL**
- **ENVIÓ DE INFORMACIÓN HACIA EL INTERNET**

ABSTRACT

Next, a semiautomatization solution is presented for a problem that is generated in a medical environment dedicated to balsa wood, as an initial procedure for data density is based through operators that use measuring elements (flexometer and balance) manage to obtain the volume and the weight respectively of each list of balsa wood for its later operation in a software of the company and mark it with the value of the established density, due to this information a bottleneck is generated in the process of the plant that is dedicated to the publication of lists of balsa wood, as a solution there is a semi-automatic proposal based on weight and distance sensors, programmable control units that work have a robust mechanical structure that guarantees the correct functioning in the process for the measurement of the density in lists of balsa wood, arriving at an optimizar (reduce the duraci of the current process that are about 8 seconds per list on average) the measurement times of the slats with precision, precision and that there is no type of affectation by the work environment (dust and clay).

KEYWORDS:

- **MEASUREMENT OF DENSITY**
- **INDUSTRIAL EQUIPMENT**
- **IT SENT FROM INFORMATION TO THE INTERNET**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes. – La madera de balsa es una materia prima de gran utilización en la industria, ya que debido a sus propiedades mecánicas y puesto que es de origen natural, renovable, biodegradable y de un bajo costo. En el trabajo “*Compressive response and failure of balsa wood*” realizado por Da Silva & Kyriakides en el año 2007, se demostró mediante ensayos las propiedades mecánicas (elásticas e inelásticas) en las direcciones axial, radial y tangencial en función de la densidad de la madera bajo cargas a compresión. (A. Da Silva, 2007)

Con las evidencias obtenidas durante estas pruebas se pudo apreciar que al trabajar bajo compresión las probetas en la dirección axial, las fallas iniciaron con un retorcimiento en el plano axial–tangencial, esto se debe a que la microestructura de la madera de balsa suele estar conformado por células de dimensiones largas y delgadas que se encuentran alineadas de una manera axial sobre la superficie longitudinal del tronco del árbol y suelen ubicarse en las capas circulares que forman los anillos, a estas células se las denomina traqueidas, cumplen con la función principal de dar un soporte estructural a la planta. La sección transversal de las células tiene una forma hexagonal similar al de un panel de abeja tal como se puede apreciar en la Figura 1. (A. Da Silva, 2007)

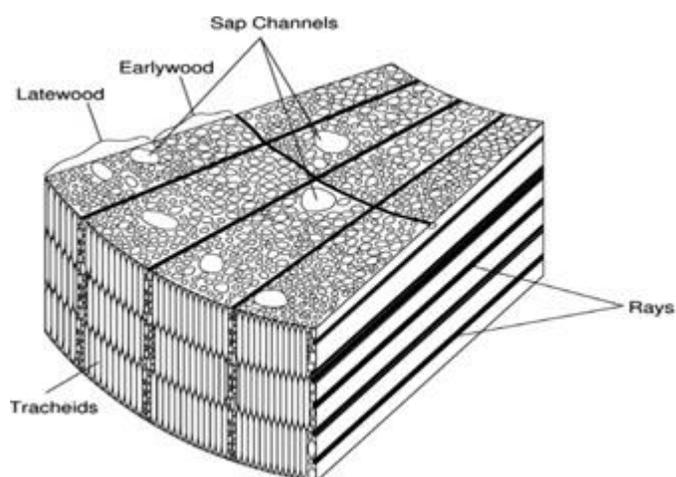


Figura 1. Microestructura de la Madera de Balsa
Fuente: (A. Da Silva, 2007)

Basándose en los datos del Boletín del “Análisis de Mercados Internacionales” de Julio a Agosto de 2013, nuestro país puede ser considerado como uno de los mayores productores y exportadores de madera de balsa con una muy buena calidad en el mercado internacional. El panorama a la interna del país es algo diferente ya que la demanda es muy pequeña, porque apenas el 10% es utilizada, ya sea en la elaboración de artesanías u otras actividades, mientras que el 90% de la producción tiene como finalidad la exportación. Como dato adicional el Banco Central del Ecuador registra un promedio de 40 empresas exportadoras de madera de balsa. (Hetsch, 2004)

De acuerdo a “González, Cervantes, Torres & Simba (2010)”, en su estudio titulado “Caracterización del Cultivo de Balsa en la Provincia de Los Ríos - Ecuador”, se conoce que en el país las provincias donde se concentra la mayor producción de madera de balsa son Los Ríos, Guayas, El Oro, y Pichincha con más de 20 mil hectáreas de plantaciones, entre bosques naturales y reforestados. (Christian Narváez Muñoz, 2018)

1.2 Definición del Problema. - En las empresas madereras los procesos de automatización a nivel industrial, son una necesidad debido a las funciones que se realizan en las mismas y están empezando a tener un impacto positivo ya que son una solución para optimizar los procesos.

En la empresa “Gandara Engineering”, que se dedica a la exportación de madera de balsa, se produce un cuello de botella en la etapa donde se realiza la medición de la densidad para los listones de madera, ya que el proceso utilizado actualmente es manual mediante operarios, es decir en una estación de trabajo llegan los lotes con listones de madera de balsa, donde el operador pesa el listón en una balanza y mide las longitudes geométricas para obtener la masa y volumen respectivamente, luego estos valores se ingresan en un software que la empresa adquirió anteriormente para agilizar y evitar errores de cálculo por parte del operario. Posteriormente a esto dependiendo del rango que se encuentre la densidad se marca el listón y se continua con el proceso, sin ningún tipo de reporte o seguimiento del procedimiento realizado.

1.3 Área de Influencia. - La realización de este proyecto tendrá influencia directa en la optimización del proceso industrial en la medición de la densidad para listones de madera de balsa, además de aumentar el conocimiento de materiales comunes en el mercado ecuatoriano, el objetivo es diseñar y construir una máquina de fácil utilización, capaz de determinar la densidad de los listones de madera de balsa, ya que actualmente se produce un cuello de botella en la producción debido a la metodología que se emplea (medición de la densidad de cada listón basándose en criterios matemáticos con las dimensiones geométricas y el peso).

El equipo de medición tiene fines de producción, aunque también puede utilizarse para la investigación, fortaleciendo los conocimientos para la obtención de la densidad de la madera de balsa. Este proyecto involucra conocimientos de ciencias de materiales, diseño de elementos de máquinas, instrumentación industrial, así como también conocimientos en programación de PLC's para operar los datos obtenidos de la masa y volumen de cada listón, esto conlleva conocimientos de control industrial, necesario en la implementación del tablero para la operación adecuada del sistema.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar, construir e implementar un equipo para la Medición de la densidad en listones de madera de balsa.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un equipo con la capacidad de toma y envío de datos.
- Analizar los resultados obtenidos y determinar la precisión del valor de la densidad obtenida.
- Dimensionar los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos del sistema de control para la automatización del equipo.
- Validar el correcto funcionamiento del equipo de medición, al momento de enviar los datos hacia el internet.

1.5 Justificación e Importancia. – La empresa Gandara Engineering como parte final en la producción de listones de madera de balsa, obtiene dicho producto en diferentes medidas (rango de trabajo Max (90 x 60 x 30) cm y Min (30 x 5 x 2) cm), y con un rango de peso que varía desde los 100 g hasta los 5 kg para la clasificación del mismo, independientemente de las dimensiones es necesario conocer la densidad de cada listón, ya que el valor de esta característica le brinda a la madera de balsa propiedades mecánicas únicas para cada listón, por lo que este aspecto define el precio del producto, teniendo un área técnica que se dedica a la medición de la densidad de cada listón resulta una tarea de gran importancia en la producción de la fábrica.

El proceso de obtención de la densidad en la industria consiste en un método manual que utiliza operadores en tres estaciones, con horarios de trabajo en los equipos de hasta 8 horas por día de lunes a viernes, para obtener el volumen de cada uno de los listones de madera de balsa, posteriormente se pasa a pesar los mismos y mediante operaciones matemáticas obtener la densidad de cada listón para poder clasificarlo. Este método está expuesto a una serie de posibles errores tanto de medida, calibración, error y fatiga humana, sobre todo cuando se presentan altas cantidades de producto, además la información sobre la densidad es manejada por los operadores y sin ningún tipo de documentación o reportes.

La etapa de medición tiene en promedio de utilización 2016 horas al año, con una exactitud inexacta sujeta a las capacidades y condiciones del operador.

El presente proyecto plantea desarrollar un equipo que permita obtener la densidad de los listones de madera de balsa producidos por la empresa “Gandara Engineering” para su posterior envío de información hacia el internet, usando herramientas precisas como sensores para la medición de distancia y peso que trabajando conjuntamente son capaces de determinar la densidad del material, se busca una exactitud aceptable, ya que estos elementos son menos propensos a presentar errores de medición.

La empresa se verá beneficiada con la instalación de este equipo industrial ya que agregará confianza, seguridad y rapidez mediante un método eficaz en el proceso de clasificación de los listones de madera de balsa. El tiempo de obtención de la medida de densidad que se busca reducir es de 8 segundos en promedio a 2 segundo en promedio, lo cual podría aumentar la eficiencia significativamente el proceso de medición.

1.6 Alcance del Proyecto. - El proyecto tiene como finalidad la medición de la densidad en listones de madera de balsa, para la empresa “Gandara Engineering” analizando las respuestas generadas por un sensor de distancia y la celda de carga (peso) en conjunto con los datos dimensionales (Largo y Ancho) generados a partir de entradas del panel de control, que serán ingresados por un HMI del PLC. Mediante la unidad de control se procesará los datos receptados, para obtener la densidad de cada listón de madera de balsa.

Se plantea realizar la validación de los datos obtenidos mediante pruebas aleatorias en los listones de balsa para comprobar la eficacia, veracidad y confiabilidad del equipo industrial.

1.6.1 Componentes mecánicos

Los componentes mecánicos de este proyecto se basan en la infraestructura del equipo ya que debe garantizar un sistema robusto que trabajara sin problema en las condiciones ambientales de la empresa.

1.6.1.1 Estructura de soporte

Este componente, es la base para la medición de la densidad ya que es donde se posicionan los listones de madera de balsa, además es el soporte para sensores y mecanismos de sujeción de la máquina. Es necesario que proporcione robustez y seguridad para evitar posibles errores de inestabilidad en el momento del funcionamiento.

1.6.1.2 Tablero de Control

Se requiere de una cubierta ergonómica para que la unidad de control sea de fácil manejo, además de que proteja al PLC y otros elementos, ya que el ambiente de trabajo opera con polvo y ruido constante.

1.6.1.3 Módulo de Pesaje

El diseño de módulo de pesaje estará construido para soportar la vibración producidos por el entorno de trabajo, robusto, capaz de soportar polvo, alta carga cíclica, compensar esfuerzos axiales y de impacto. Además de que la estructura debe soportar la corrosión.

1.6.2 Componentes electrónicos/eléctricos

1.6.2.1 Sensores

SENSOR DE DISTANCIA:

Se planteará la selección para un sensor de distancia capaz de ofrecer mediciones de distancias sin contacto, con una precisión de hasta 1.25mm a través del polvo, el humo y el vapor, en zonas donde existe ruido (70 dB), que posea la capacidad de detectar todo tipo de objeto, de alta fiabilidad y sin problemas de contaminación. Entre algunas opciones planteadas inicialmente tenemos a los sensores ultrasónicos, magnéticos y laser, cada uno tiene un principio de funcionamiento único pero cumplen el mismo fin que es transformar una señal de distancia en una señal eléctrica (4-20 mA o 0 a 10 V).

1.6.2.2 PLC LOGO

Características Generales

- 8 unidades básicas para todos los voltajes.
- Todas las unidades integran interfaz Ethernet
- Web Server integrado en todas las unidades.
- Display con Nuevo aspecto.
- 7 módulos de ampliación digital y 3 analógicos.
- Módulo CMK2000, CM EIB/KNX (Nuevo)

1.6.2.3 CELDA DE CARGA:

Celda de carga tipo Viga con una capacidad de hasta 6 kg. Debido a los requerimientos solicitados en la empresa, ya que los rangos de peso varían entre 100g y 5 kg.

1.6.2.4 TRANSMISOR DE SEÑAL PARA LA CELDA DE CARGA

Debido a la naturaleza de la señal emitida por la celda de carga (0-10 mv), se debe utilizar un circuito o módulo de amplificación que permita conectar la información obtenida del sensor con las entradas analógicas del PLC (0-10 V o 0-20 mA), para su posterior procesamiento.

1.6.3 Componentes del Sistema de Control

1.6.3.1 Unidad de control

Se encargará de la recepción y del envío de información de acuerdo con los parámetros que se obtenga y la decodificación de los datos tomados por los sensores.

1.6.3.2 Interfaz de control y monitoreo (HMI)

Es la pantalla donde se podrá ingresar los datos de largo y ancho de cada lote, así mismo debe presentar la información adquirida por los sensores y el resultado que es la densidad de cada listón.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos de la Densidad. – El concepto de densidad es tan antiguo que se debe remontar a la época de la antigua Grecia donde el físico, ingeniero, inventor, astrónomo y matemático Arquímedes, definió esta magnitud, diciendo que si se sumerge un cuerpo en un fluido (por ejemplo agua), se tendrá un empuje de carácter vertical hacia arriba que equivale al peso del fluido que se van desalojando, esto lo noto al momento de introducirse en una bañera, como anécdota se cuenta que este descubrimiento fue de tal impacto para Arquímedes que salió desnudo a la calle gritando: “Eureka, lo he encontrado”. (Gamow, 2009)

Definiendo de una manera más concisa la densidad se establece como la cantidad de masa en un determinado volumen de un cuerpo. [1]

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ecuación (1)

Dónde: ρ es la densidad del cuerpo

m : es la masa del cuerpo

V : es el volumen del cuerpo

2.2 Madera de balsa. - La balsa (*Ochroma pyramidale*) es considerada una de las maderas más ligeras del mundo. Ya que su rango de densidad varía desde los 40 hasta los 380 kg/m³, estos datos varían en base a la edad y también depende del hábitat donde crece el árbol (A. Da Silva, 2007). A nivel de microestructura celular la madera de balsa posee un volumen considerable de espacio vacío, por lo que tiene una rigidez y resistencia axial específica muy elevada en comparación a otro tipo de materiales; además tiene como característica destacable la capacidad de absorción de energía que se debe a la baja densidad que posee. Es más, tal vez sea el único material que puede absorber energía específica. (A. Da Silva, 2007)

Un aspecto importante a considerar en la madera es su crecimiento que está relacionado con el número de anillos que se forman en el árbol con el pasar del tiempo, un indicador relativo de la densidad para los arboles es el número de anillos ya que si estos anillos no se marcan de una manera clara se tiende a entender que posee una densidad elevada, mientras que por el contrario si las marcas de los anillos se pueden apreciar fácilmente, se entiende que la densidad de la madera será baja. (Christian Narváez Muñoz, 2018)

Se conoce que, en la actualidad, Ecuador posee, un poco más de 20 mil hectáreas de plantaciones entre bosques naturales y reforestados. Teniendo como zonas de mayor producción a las provincias del Guayas, El Oro, Los Ríos y Pichincha.

Las exportaciones se van realizando tomando en cuenta la demanda externa ya que al igual que en otros tipos de materia prima a la interna del país se tiene una demanda muy pequeña. Tanto así que se conoce que apenas un 10 % se utiliza para la elaboración de artesanías caseras, por otra parte, el 90% de la madera se exporta hacia el extranjero teniendo como grandes compradores a Estados Unidos y una parte de la comunidad económica europea dicha madera se exporta en forma de tableros, láminas, bloques y madera aserrada. (Almeida M. M., 2017)

Desde su reforestación esta madera ha logrado alcanzar un gran desarrollo, teniendo incluso una transformación por los nuevos cambios climáticos, pasando a convertirse en la madera de balsa con mayor calidad en la escala mundial. Este tipo de especie es de suma importancia a nivel comercial proveniente de la cuenca del Río Guayas en Ecuador; ya que de aquí se obtiene aproximadamente el 95% de la cosecha mundial. (Almeida M. M., 2017)

2.3 Propiedades de la Madera de Balsa. – Como hemos expuesto hasta ahora la madera de balsa, es un elemento que se exporta casi en su totalidad hacia Estados Unidos o Regiones de Europa, pero ¿a qué se debe esta gran demanda?, pues las propiedades de la madera son únicas y se hará un pequeño detalle de los datos más relevantes, para comprender mejor este hecho. (Ríos, 2011)

2.3.1 Estructura y Funciones de la Madera: Para empezar, se debe definir que la madera es un material con una estructura compleja, ya que es un compuesto formado por varios tipos de células y químicos que interactúan mutuamente para satisfacer los requerimientos que tiene un ser vegetal vivo. A lo largo de los años la madera ha ido teniendo cambios evolutivos que desembocan en el cumplimiento de 3 factores muy importantes como lo es:

- Conducción del Agua desde la raíz hasta las hojas
- Ser quien soporta el peso del cuerpo de la planta
- Almacenamiento de sustancias bioquímicas

Los seres humanos aprovechamos las propiedades físicas, químicas, mecánicas, tecnológicas, entre otras que se derivan de estas funciones principales que posee la madera. La evolución con el paso del tiempo de estas 3 principales características ha desembocado en la generación de aproximadamente 20 000 tipos de plantas, donde cada una de las diferentes especies poseen capacidades únicas tanto a nivel vegetal, como para ser aprovechadas por el ser humano. Sin embargo, una recomendación es que primero debemos entender sus capacidades y fortalezas como árbol (es decir comprender que propiedades fueron evolucionando para que el árbol tenga una mejora en sí mismo), para después analizarla y seleccionar las características que pueda utilizar el ser humano en beneficio del desarrollo nuestro. (Christian Narváz Muñoz, 2018)

2.3.2 Tipos de Madera. – La madera se pueden clasificar en dos grandes tipos de madera como lo son:

- **Madera Dura:** El hecho de que tenga el nombre de madera dura no significa que todas sus subclasificaciones tengan una estructura de madera robusta y pesada, sino que su significado viene desde un concepto de botánica que establece que las maderas duras son aquellas que provienen plantas angiospermas (plantas con flores). (Christian Narváez Muñoz, 2018)
- **Madera Blanda:** Por otra parte, este tipo de madera se define por el concepto de botánica, que nos dice que este tipo de madera proviene de las gimnospermas (la mayoría son coníferas). (Christian Narváez Muñoz, 2018)

Otra característica de este tipo de madera es que su estructura es más simple que las maderas duras, ya que posee únicamente dos tipos de células con una pequeña variación entre ellas, por lo que no poseen de la célula llamada vaso o poro. (Christian Narváez Muñoz, 2018)

La madera de balsa también tiene toda una composición interna a nivel de microestructura, sin embargo, en el desarrollo de nuestro proyecto es de mayor interés su composición a nivel macroscópico, por lo que no ahondaremos más en estos temas de fibras o composición interna de la madera de balsa.

2.3.3 Propiedades Mecánicas. – Ya hablando de las propiedades que posee la madera de balsa, debe destacarse como uno de los factores más relevantes su beneficioso bajo peso y baja densidad. Además, que a pesar de ser muy liviana posee una gran resistencia y flexibilidad, teniendo como resultado una madera bastante fuerte,

hablando de ella en el campo de la manufactura permite realizar unas terminaciones muy finas. Cabe recalcar que se debe pasar por todo un proceso de secado para lograr obtener dichas características, este secado debe realizarse de manera inmediata posteriormente al ser cortada, ya que, debido a la humedad que presenta al ser una madera podría llegar a podrirse y desarrollar hongos con mucha facilidad, comprometiendo la balsa desde un inicio. (Chiriboga, 2013)

Uno de los campos de aplicación de la madera de balsa es la construcción de tanques para químicos, tinas de baño, paletas para generadores eléctricos eólicos, autos, camiones, botes, entre otros. La madera balsa tiene varias ventajas que la hacen sobresalir en comparación a muchos otros materiales. Algunas de estas cualidades son:

- La gran capacidad de aislamiento térmico y acústico
- Posee un bajo peso
- Poco movimiento de agua entre sus celdas
- Facilidad de adherirse con pegamentos

Entre otras características destacables se tiene que la balsa es muy fácil de manipular, incluso para cortarla no es necesario el uso de herramientas como sierras eléctricas u otro de los elementos que se utilizan normalmente en las maderas duras, basta con un cortante y un bloque de lija para poder trabajarla a gusto y con comodidad. Los rangos de trabajo dependen mucho de la aplicación, pero se suele

utilizar balsa de 64 kg/m³ hasta 320 kg/m³. Aunque el promedio de la balsa suele estar entre 130 y 160 kg/m³. (Chiriboga, 2013)

2.3.3.1 Relación Madera-Humedad. – La madera posee capacidades higroscópicas, (es decir absorción de humedad del medio ambiente), debido a esta interacción que se produce se debe determinar el nivel de CH (contenido de humedad), ya que este fenómeno puede afectar las propiedades de la madera de balsa, de una manera representativa, el CH se define por:

$$\%CH = \frac{m_{agua}}{m_{madera}} * 100\% \quad \text{Ecuación (2)}$$

Dónde: m_{agua} es la masa de agua en la madera

m_{madera} es la masa de la madera secada

Otra manera de calcular el valor de la cantidad de humedad es mediante, la siguiente expresión:

$$\%CH = \frac{m_{humeda} - m_{seca}}{m_{seca}} * 100\% \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde: m_{humeda} es la masa de la muestra a un CH dado

m_{seca} es la masa de la muestra secada

2.3.3.2 Propiedades Elásticas. – Las características más importantes de la madera de balsa, se encuentran el módulo de elasticidad, el módulo de corte y el coeficiente de poisson. Considerando que la madera es un material ortotrópico cabe mencionar que posee doce constantes: (Betty González, 2010)

- Tres módulos de Elasticidad
- Tres módulos de Rigidez
- Seis coeficientes de Poisson

Módulo de elasticidad (MOE): La definición de elasticidad comprende a las deformaciones que se producen al momento de soportar diversas cargas y que se eliminan al retirar los mencionados esfuerzos productos de las cargas a las que estuvo sometido. Si se sobrepasa el límite elástico se llega a la zona plástica y podría provocarse incluso la rotura del material. (Almeida M. M., 2017)

Módulo de Rigidez o Corte: Por otra parte, el módulo de rigidez muestra la capacidad de resistencia al ser sometido a un esfuerzo por cizalladura. (Almeida M. M., 2017)

Coefficiente de Poisson: Este denominado coeficiente se produce cuando en un ensayo a una probeta se le somete una carga axial, la relación que se genera entre la deformación transversal y axial, es conocido como coeficiente de Poisson. (Almeida M. M., 2017)

2.3.3.3 Propiedades de Resistencias comunes. – Las denominadas propiedades de resistencia son las que se utilizan para el diseño, entre las cuales están:

- Módulo de Rotura en Flexión
- Resistencia a la compresión paralela al grano
- Resistencia a la compresión perpendicular al grano
- Resistencia a la cizalladura paralela al grano

Estas propiedades de resistencias se las obtiene a partir de ensayos a probetas pequeñas utilizando la norma ASTM D143. (Almeida M. M., 2017)

Módulo de Ruptura (MOR). – Es la capacidad máxima de carga que posee una probeta sometida a flexión y se traduce como la equivalencia del momento máximo que soportara la misma. (Almeida M. M., 2017)

Resistencia a la compresión paralela al grano. - Se le conoce como el esfuerzo máximo que soportara la probeta sometida a compresión que este en dirección paralelo al grano. La madera de balsa posee valores muy altos para este tipo de ensayos. (Almeida M. M., 2017)

Resistencia a la compresión perpendicular al grano. - Se le conoce como el esfuerzo máximo que soportara la probeta sometida a compresión que este en dirección perpendicular al grano. (Almeida M. M., 2017)

Resistencia a la cizalladura paralela al grano. - Se le considera como la capacidad que posee la madera de resistir el desplazamiento interno de una fibra sobre otra.

2.3.3.4 Propiedades Menos Comunes. – Otro tipo de propiedades que posee la madera de balsa, pero que no son muy comúnmente experimentadas son:

- Tenacidad
- Fatiga

Tenacidad. – Se considera tenacidad a la cantidad de energía que se requiere para conseguir una falla completa de manera rápida en una probeta que está sometida de una manera central a flexión. (Almeida M. M., 2017)

Fatiga. – Es la resistencia que se produce al fallo de una combinación de condiciones, como cargas cíclicas, frecuencias, tensiones máximas, relaciones entre el mínimo y máximo esfuerzo, además de otros factores. (Almeida M. M., 2017)

2.4 Maquinaria que mide la densidad. – Como sabemos la medición de la densidad es un parámetro muy importante en el control de calidad tanto para las materias primas como en los productos terminados. Existen varios métodos que permiten una determinación precisa de la medida densidad de los diferentes materiales sólidos, líquidos y viscosos. (Toledo, 2018)

2.4.1 Densidad para control de calidad. - La variación en la materia prima, o un cambio en la densidad, podría provocar un resultado muy dañino en la calidad del producto final. Por lo que se debe garantizar que la medición de la densidad en materias primas, debe ser lo más cercano a lo real. Otro ejemplo se da en las sustancias ya que, si adultera un compuesto con una solución más barata, la densidad medida del material variara comparándola con la sustancia pura. (Toledo, 2018)

La densidad también es utilizada como herramienta de homogeneidad. Por ejemplo, si una pieza que ha sido manufacturada se puede apreciar niveles donde no sea homogénea, esto podría afectar los atributos de rendimiento como la fuerza o la resistencia del material produciendo agrietamientos. En otro análisis de manufactura si

se llega a provocar una burbuja de aire a la interna del material, puede que la pieza falle al someterla a presión. Una manera de arreglar este fenómeno es un muestreo aleatorio de las piezas, ya que, es una forma sencilla y económica en la supervisión de calidad. (Toledo, 2018)

2.4.2. El pesaje exacto es fundamental. – Para el cálculo de la densidad el peso es uno de los parámetros más difíciles de estabilizar, en laboratorios de metrología se utilizan gravimétricos para la determinación de la densidad basándose en el principio de empuje de Arquímedes, que se basa en el desplazamiento y el método picnómetro. (Toledo, 2018)

En la Figura 2 se tienen los diferentes equipos que se utilizan para la determinación de la densidad en varios materiales, así como ventajas y desventajas de los mismos:

	Gravimétrico, empuje	Gravimétrico, desplazamiento	Picnómetro	Densímetro digital
Métodos	 El vaso de precipitado para líquido auxiliar se coloca de pie en una plataforma o debajo de la balanza.	 El vaso de precipitado para líquido auxiliar se coloca de pie en la balanza.	 Material de vidrio con volumen definido.	 Tecnología de tubo de oscilación
Adecuado para	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos Líquidos (con cuerpo de desplazamiento de vidrio) 	<ul style="list-style-type: none"> Sustancias pastosas (con esfera de gamma) Líquidos (con cuerpo de desplazamiento de vidrio) Sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> Líquidos, dispersiones Lleno Gránulos 	<ul style="list-style-type: none"> Líquidos Gases
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Proceso rápido Flexible en relación con el tamaño de la muestra Instrumento de pesaje ya disponible 	<ul style="list-style-type: none"> Proceso rápido Instrumento de pesaje ya disponible 	<ul style="list-style-type: none"> Método exacto Instrumento de pesaje ya disponible 	<ul style="list-style-type: none"> Proceso rápido Control exacto de la temperatura por los elementos Peltier Medición automática de la densidad Volúmenes pequeños de muestras
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a la temperatura La muestra debe mojarse con mucho cuidado No deben quedar burbujas de aire atrapadas 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a la temperatura Se requiere un gran volumen de muestra 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a la temperatura Gran intensidad de mano de obra Requerir bastante tiempo No deben quedar burbujas de aire atrapadas 	<ul style="list-style-type: none"> Las muestras viscosas requieren una corrección de la viscosidad (disponible en instrumentos modernos).

Figura 2. Elementos utilizados en la Medición de la Densidad
Fuente: (Toledo, 2018)

2.5 Industria Maderera en el País. – Hablando de la situación interna del País, se puede decir que la industria dedicado al aserrado, va implementando diferentes herramientas tecnológicas que ayudan a mejorar los estándares de eficiencia de la materia prima, aunque sigue siendo un proceso que se basa en el apoyo fundamental de la habilidad del personal en el aserradero y por otra, en las características de las piezas mediante el uso de softwares de optimización, que poseen la capacidad de analizar diversas variables y posteriormente realiza la toma de decisiones de aserrado en cortos rangos de tiempo. (Almeida J. M., 2013)

La principal forma para el procesamiento de la madera de balsa, es partiendo de la troza, en el aserrado mediante una variedad de maquinaria o herramientas que van desde las motosierras, llegando hasta los aserríos con alta tecnología, que poseen una capacidad de producción para madera aserrada con un bajo factor de desperdicio y a una buena calidad. Realizando una evaluación sobre las industrias que se dedican al aserrado podemos decir que están sujetas a una interacción de múltiples variables, que con el pasar del tiempo van aumentándose de manera constante nuevos factores modificando de una manera considerable las condiciones iniciales de operación. (Almeida J. M., 2013)

También hay que mencionar que el desarrollo del sector maderero está influenciado de una manera directa por: la calidad de la materia prima, que se basa principalmente en el característico peso bajo que posee y que no tengan defectos de forma como rajadura, nudos, corazón de agua y torcedura, otro aspecto a considerar es la edad, el tamaño y la forma de la troza. (Almeida J. M., 2013)

Se tiene un mercado mundial que está sujeto a la necesidad de la madera de balsa con una buena calidad, que se posea un sistema continuo de abastecimiento, junto con un precio que sea competitivo, estos aspectos dificultan el acceso hacia los mercados internacionales debido a los estándares que se manejan ahí, pero la competitividad y globalización, permitieron que las plantaciones de madera de balsa lleguen a producir, una materia prima de muy buena calidad, generado además fuentes de empleo. (Almeida J. M., 2013)

Durante un periodo donde las exportaciones y productores nacionales atraviesan por una crisis, la madera de balsa ecuatoriana parece no sentir estos problemas. Considerando que el sector de la madera no ha estado en su mejor temporada en este último periodo, la demanda que se va presentando sobre este producto se proyecta con un buen panorama debido a sus características que pueden ser utilizados en la construcción de energía limpia que es uno de los nuevos motores de cambio energético impulsado por naciones como China y EEUU, para estos países la madera la balsa ecuatoriana se inserta muy bien pues es considerada la mejor opción por lo que es una de las más solicitadas. (Chave, 2006)

Si nos basamos en los números podemos ver que las exportaciones tuvieron en diciembre del 2015 un total de ventas totales de \$ 152'176.940, por el peso de 39.106 toneladas que se enviaron hacia el extranjero. Sin embargo, en el 2011 y 2013 la madera de balsa afrontó una caída que desembocó en el cierre de varias pequeñas empresas. Pero se pudo superar este inconveniente gracias a los múltiples usos que posee la balsa, conjuntamente con el ingenio de los empresarios nacionales. Actualmente se puede decir que se está cosechando el esfuerzo que se tuvo durante varios años, sin olvidar la importancia de ir mejorando diariamente para poder tener un poder más representativo internacionalmente a nivel competitivo y lograr mayores inversiones además de entregar productos con un valor agregado. (Parra, 2015)

2.5.1 Aplicaciones. – Como ya se mencionó la utilidad de la madera de balsa es muy amplia, es así que puede abarcar diferentes tipos de aplicación, los 5 más grandes campos donde se aprovecha este material son:

- Energía Eólica
- Marina
- Industrial
- Transporte
- Entretenimiento

También puede utilizarse en construcciones: ya que tenemos rellenos y soportes en condensadores, en el ámbito eléctrico existen: transformadores eléctricos. Cometas meteorológicas. Y en otras aplicaciones podría usarse en Partes interiores y espaciadores en muebles. Balsas, flotadores, boyas, redes salvavidas. Cajonería para sombreros, chocolates y tabacos. Embarcaciones de vela. Capas internas de botes de fibra de vidrio. Forros de tanques en barcos petroleros. Artículos deportivos: corchos y anzuelos, mangos de cuchillos de pesca y en cinturones de nadar. (Parra, 2015)

Alguna de dichas aplicaciones puede apreciar en la Figura 3.

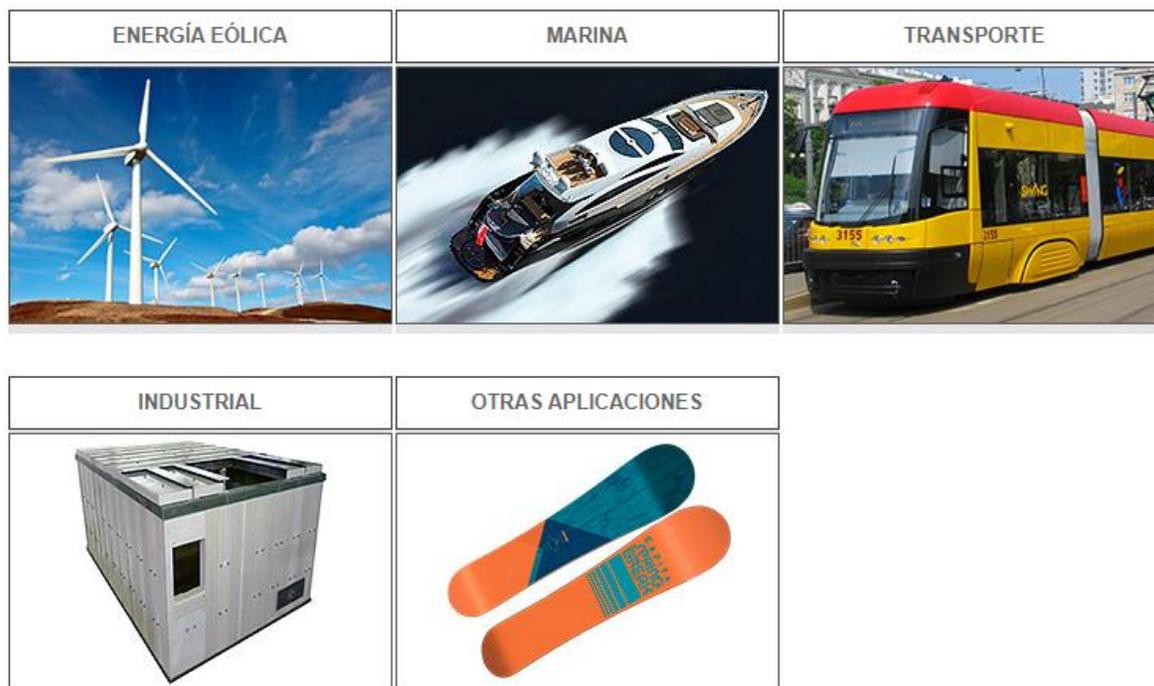


Figura 3. Aplicaciones de la Madera de Balsa

Fuente: (Balsaflex, 2018)

2.6 Sensores en la Industria

Para cualquier tipo de proceso industrial se debe considerar a los sensores como a un equivalente de nuestros sentidos ya que estos sirven para proporcionar información a la etapa de control, donde puede ser un microprocesador el que cumple las funciones de coordinación. (Publicación, 2015) Por lo tanto, se podría decir que se va a controlar una acción como si se estuviera pensando; emulando un criterio de juzgamiento y decisión para así poder Actuar como el ser humano que tiene la capacidad de mover el esqueleto y los músculos, mientras que se podría presentar como un ejemplo de lo que representa el proceso de medición por parte del sensor sobre los datos. (Parra, 2015)

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO

3.1 Metodología del Diseño. – La metodología utilizada será la planteada para sistemas mecatrónicos VDI 2206, ya que en esta norma se establece un diseño concurrente, donde se muestra una integración de conocimientos (mecánicos y electrónicos) que junto con el uso de tecnologías de la información brinda soluciones durante las diferentes etapas de un proyecto. En la Figura 4 se presenta el modelo V que sigue dicha metodología.

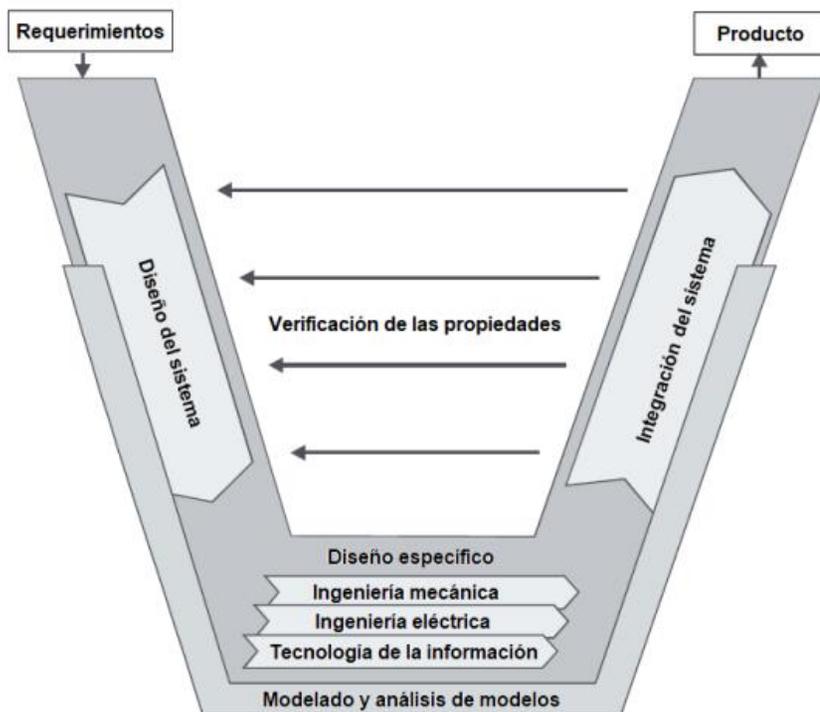


Figura 4. Metodología del Diseño en V
Fuente (VDI 2206, 2004)

A continuación, una breve explicación de las diferentes etapas que tiene el modelo V de la Figura 4.

3.1.1 Requerimientos:

Para iniciar el proyecto de manera clara, debemos tomar el objetivo principal y desarrollarlo de tal manera que se pueda establecer un listado de métricas, que posteriormente servirían como indicadores de evaluación para determinar el cumplimiento y funcionalidad del proyecto.

3.1.2 Diseño del Sistema:

Lo que se busca en esta etapa es plantear una solución donde se permita integrar las capacidades mecánicas y de control del proyecto a implementarse. Para lograrlo de manera ordenada y eficaz se busca dividir al sistema principal, en subsistemas donde cada uno de estos se lo evaluara en base a su funcionalidad en relación a la del sistema principal.

3.1.3 Diseño Específico:

Teniendo un concepto base ya definido como solución, se establece un diseño en detalle que garantice de una manera técnica la correcta funcionalidad de los subsistemas y del sistema principal.

3.1.4 Integración del Sistema:

Cuando se logra una correcta respuesta por los subsistemas se debe observar la integración como un sistema principal, donde se evaluará la interacción de los subsistemas y su desempeño.

3.1.5 Verificación de las propiedades:

Los avances que se van obteniendo a partir de la solución establecida deben ser evaluados constantemente en base a los requerimientos. Garantizando que las propiedades reales se acerquen de una manera exacta a las propiedades deseadas por el proyecto.

3.1.6 Modelado y Análisis de Modelos:

Cada etapa debe tener un análisis de las propiedades del sistema, esto se puede representar mediante apoyos técnicos como modelos matemáticos y softwares de simulación.

3.1.7 Producto:

Es el resultado que se presenta como consecución final de la investigación, que puede ser el producto final como tal o una base que sirva de precedente para un producto futuro (madurez del producto). Teniendo como grados de madurez diferentes tipos de muestras o un prototipo inicial.

Para partir hacia un diseño se debe analizar los diferentes requerimientos que se tiene por parte de la Empresa, entre los más relevantes se tiene:

- Rangos de Peso: 0 a 6 kg
- Área de Trabajo: 600x600 mm²
- Que tenga en los apoyos material antideslizantes (Evitar que la máquina se tambalee y provoque errores en la lectura de datos).
- Precisión del 5%
- Material Metálico para la estructura mecánica.
- Temperatura: 10 a 30 °C
- Portabilidad (Fácil de Mover de un punto a otro)
- Nivel de Ruido Acústico (70 dB)
- Volumen de Trabajo 600x600x800 mm³
- Nivel Humedad Relativa (40-70%)
- Dimensiones de Listones Min (30x5x2) cm y Max (90x30x60) cm
- Fácil Operación
- Precio Competitivo en el Mercado (\$1500-\$2000)
- Reducir el cuello de Botella (8 segundos/listón a un tiempo menor de segundos/listón).

3.2 Diseño del Subsistema Mecánico:

3.2.1 Requerimientos:

El subsistema mecánico se diseña para brindar estabilidad y una seguridad mecánica para que el prototipo pueda operar sin ningún tipo de problemas en las condiciones de trabajo que se tiene tanto en temperatura, humedad, vibración y polvo, además de realizar una compensación mecánica para la celda de carga.

3.2.2 Diseño:

Siguiendo la norma CPE INEN 003 para el diseño mecánico, así como el uso de herramientas CAD y CAE en el prototipado de maquinaria industrial y basándose en los requerimientos se establecen como posible solución el siguiente esquema del diseño a implementar. (Aceros, 2017)

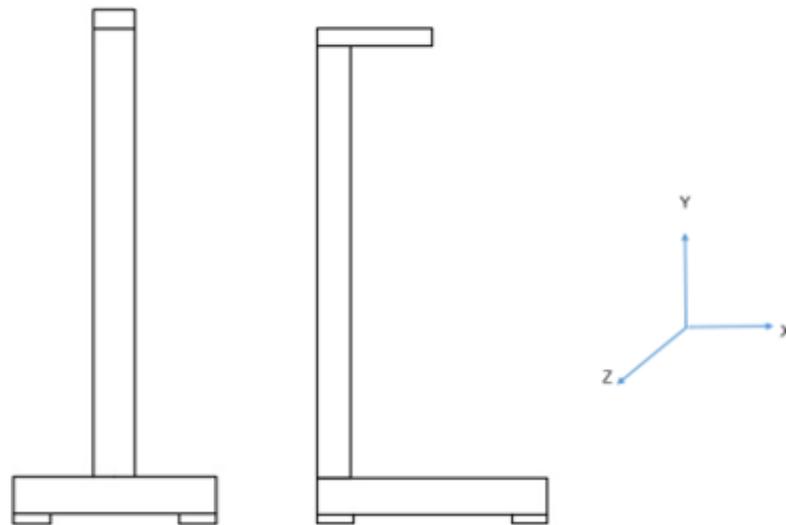


Figura 5. Esquema del Equipo a Implementarse

Se eligió el esquema presentado en la Figura 5, debido a que así se garantiza un nivel de referencia como es la base para la medida del sensor de distancia, además que el rango de trabajo que tendrá en esta zona será de 0 a 600 mm y la altura planteada desde la base al brazo es de 800 mm.

De este primer esquema podemos determinar las siguientes partes.

- Estructura Base (Área de Trabajo: 300x300 mm)
- Compensador de Pesaje
- Brazo Soporte (Área de Trabajo: 250x45 mm)
- Plato Base

Una vez definidas las partes que se tendrá que implementar en el subsistema mecánico, pasamos a la etapa de diseño.

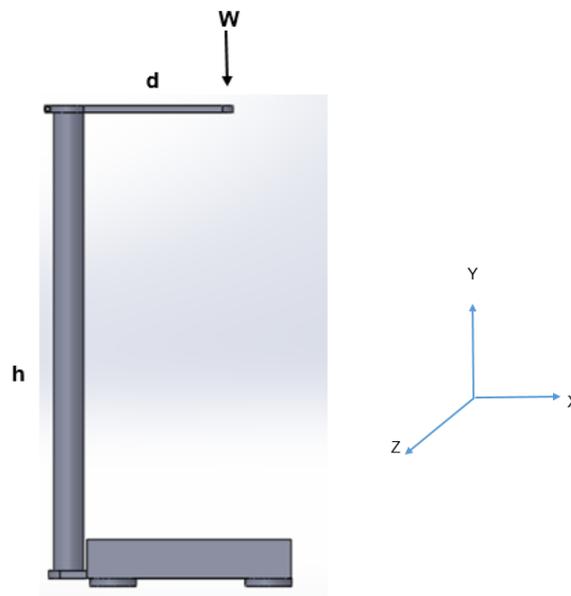


Figura 6. DCL del Subsistema Mecánico

Análisis de Esfuerzos Admisibles y factor de seguridad:

Partimos con los datos que se establecieron en los requerimientos del equipo y con condiciones iniciales tomadas referencialmente de los sensores de distancia a utilizar (el sensor con mayor peso), las herramientas de medición con las que se determinó las dimensiones que se presentan a continuación fueron (Calibrador de Tornillo Dual Stanley 78-201, Flexómetro Stanley de 5 metros, Balanza Electrónica Torrey 20 kg con 2 gr. De Precisión):

Placa: $b=45$ mm

$h=250$ mm

$m=35$ gr. (masa sensor + masa del tubo protector)

$Y= 4.5$ mm (Mitad del espesor de la placa)

$d=192.5$ mm

Determinación de Momentos:

Momento Flector:

$$M = W * d \text{ N.mm} \qquad \text{Ecuación (4)}$$

Al momento de trasladarse al nivel de referencia el peso pasa por la línea de acción, es decir no existe un momento Torsor.

$$T = 0 \text{ N.mm} \qquad \text{Ecuación (5)}$$

Ahora se procede a calcular el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{M*Y}{I} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde: M: Momento Flector

Y: Distancia del centro a la Fibra

I: Segundo Momento de Inercia (Placa)

El segundo momento de inercia para una placa viene especificado por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{b*h^3}{12} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Reemplazando datos:

$$I = \frac{45mm * (250 mm)^3}{12}$$

$$I = 58593750 mm^4$$

Ahora se procede a calcular el esfuerzo con los datos obtenidos:

$$\sigma = \frac{0.035Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 192.5 mm * 4.5mm}{58593750 mm^4}$$

$$\sigma = 5.076 MPa$$

Al tratarse de unos materiales dúctiles, se utilizará los criterios de Tresca (Conservador) y Von Mises (Optimista), para determinar los esfuerzos equivalentes y por ende los factores de seguridad.

Para la determinación de los esfuerzos en cada eje tenemos que para el momento "Torsor YZ" es igual a 0, ya que no existe torsión en el tubo de altura h, y para el "Plano YY" tenemos que es igual a cero ya que se encuentra en el mismo plano de referencia:

$$\sigma_{zz} = \sigma = 5.076 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yz} = 0$$

$$\sigma_{yy} = 0$$

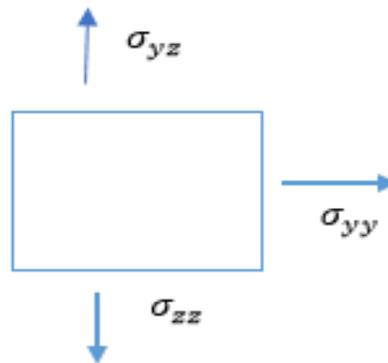


Figura 7. Diagrama de Esfuerzos

Procedemos a la determinación del centro y radio de los círculos de Mohr:

$$C = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{yy}}{2} \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$C = \frac{5.076 \text{ MPa} + 0}{2}$$

$$C = 2.538 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{zz} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{yz}^2} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(5.076 \text{ MPa} + 0 \text{ MPa})^2 + 0 \text{ MPa}}$$

$$R = 2.538 \text{ MPa}$$

Teniendo como esfuerzos:

$$\sigma_1 = C + R \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$\sigma_1 = 2.538 \text{ MPa} + 2.538 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = 5.076 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = C - R \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\sigma_2 = 2.538 \text{ MPa} - 2.538 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 0$$

El Esfuerzo 3 es igual a cero ya que solo se trabaja en el Plano YZ.

$$\sigma_3 = 0$$

Criterios de Falla:**Tresca:**

$$\sigma_{Eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$\sigma_{Eq} = 5.076 \text{ MPa} - 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Eq} = 5.076 \text{ MPa}$$

Von Mises:

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(5.076 \text{ MPa} - 0)^2 + (5.076 \text{ MPa} - 0)^2 + (0 - 0)^2]}$$

$$\sigma_{Eq} = 5.076 \text{ MPa}$$

Realizamos el mismo procedimiento para la estructura base, así que se establece el diagrama de cuerpo libre que se puede apreciar en la Figura 8.

Para la selección de los parámetros se realizó matrices de comparación, mostradas a continuación.

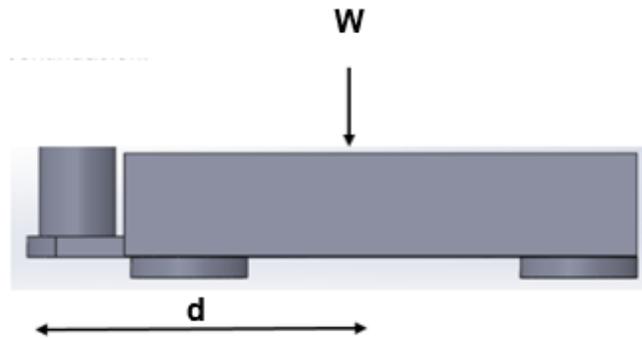


Figura 8. Diagrama Cuerpo Libre Base

Al igual que en el caso del brazo-apoyo utilizaremos partimos con los datos que se establecieron en los requerimientos del equipo y con condiciones iniciales tomadas referencialmente para el módulo de pesaje, las herramientas de medición con las que se determinó las dimensiones que se presentan a continuación fueron (Calibrador de Tornillo Dual Stanley 78-201, Flexómetro Stanley de 5 metros, Balanza Electrónica Torrey 20 kg con 2 gr. De Precisión):

Plato: $b=220$ mm

$h=220$ mm

$m=2500$ gr. (masa Estructura-Base)

$Y= 20$ mm (Mitad del espesor de la Estructura-Base)

$d=192.5$ mm

Determinación de Momentos:

Momento Flector:

$$M = W * d \text{ N.mm}$$

Al momento de trasladarse al nivel de referencia el peso pasa por la línea de acción, es decir no existe un momento Torsor. (Díaz, 2007)

$$T = 0 \text{ N. mm}$$

Ahora se procede a calcular el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{M * Y}{I}$$

Dónde: M: Momento Flector

Y: Distancia del centro a la Fibra

I: Segundo Momento de Inercia (Placa)

El segundo momento de inercia para una placa viene especificado por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Reemplazando datos:

$$I = \frac{220\text{mm} * (220 \text{ mm})^3}{12}$$

$$I = 2342560000 \text{ mm}^4$$

Ahora se procede a calcular el esfuerzo con los datos obtenidos:

$$\sigma = \frac{2.5\text{Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 192.5 \text{ mm} * 20\text{mm}}{2342560000 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma = 4.031 \text{ MPa}$$

Al tratarse de unos materiales dúctiles, se utilizará los criterios de Tresca (Conservador) y Von Mises (Optimista), para determinar los esfuerzos equivalentes y por ende los factores de seguridad.

Para la determinación de los esfuerzos en cada eje tenemos que para el momento "Torsor YZ" es igual a 0, ya que no existe torsión en el tubo de altura h, y para el "Plano YY" tenemos que es igual a cero ya que se encuentra en el mismo plano de referencia

$$\sigma_{zz} = \sigma = 4.031 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yz} = 0$$

$$\sigma_{yy} = 0$$

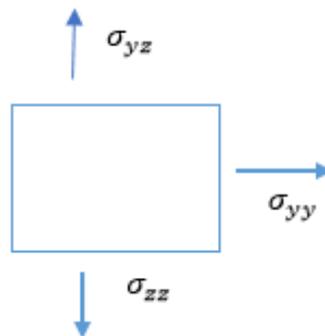


Figura 9. Representación de los Esfuerzos

Procedemos a la determinación del centro y radio de los círculos de Mohr:

$$C = \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{yy}}{2}$$

$$C = \frac{4.031 \text{ MPa} + 0}{2}$$

$$C = 2.015 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{zz} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{yz}^2}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{4}(4.031 \text{ MPa} + 0 \text{ MPa})^2 + 0 \text{ MPa}}$$

$$R = 2.015 \text{ MPa}$$

Teniendo como esfuerzos:

$$\sigma_1 = C + R$$

$$\sigma_1 = 2.015 \text{ MPa} + 2.015 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = 4.031 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = C - R$$

$$\sigma_2 = 2.015 \text{ MPa} - 2.015 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 0$$

El Esfuerzo 3 es igual a cero ya que solo se trabaja en el Plano YZ.

$$\sigma_3 = 0$$

Criterios de Falla:

Tresca:

$$\sigma_{Eq} = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_{Eq} = 4.031 \text{ MPa} - 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Eq} = 4.031 \text{ MPa}$$

Von Mises:

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(4.031 * 10^{-5} \text{ MPa} - 0)^2 + (4.031 * 10^{-5} \text{ MPa} - 0)^2 + (0 - 0)^2]}$$

$$\sigma_{Eq} = 4.031 \text{ MPa}$$

3.2.2.1 Selección de Materiales:

Una vez obtenido un criterio de esfuerzo máximo equivalente procedemos a observar los valores que se aprecian en la Figura 10 que es información que fue tomada del trabajo “*Tablas y gráficas para Diseño de Elementos de Máquinas*”.

MATERIAL	RESISTENCIA MÁXIMA		RESISTENCIA A LA FLUENCIA		MODULO DE ELASTICIDAD E	MODULO DE ELASTICIDAD G	α cm/cm.°C (x 10 ⁶)
	kg/cm ²	ksi	kg/cm ²	ksi	kg/cm ²	kg/cm ²	
ACEROS:							
NOM-1018 T.F	4500	64	3800	54	2.1E6	0.808E6	11.8
NOM-1045 T.C	6400	91	5400	77	“	“	11.8
NOM-1060 T.C	6900	98	3800	54	“	“	11.8
NOM-1075 T.C	7300	104	4100	58	“	“	11.8
NOM-4140 T.T	12000	170	11200	159	“	“	11.8
NOM-4340 T.T	12200	173	11500	163	“	“	11.8
INOX 304 REC.	5200	74	2100	30	1.96E6	0.735E6	16.0
INOX. 316 REC.	5200	74	2100	30	1.96E6	0.735E6	16.0

Figura 10. Propiedades mecánicas de los metales más comunes en ingeniería

Fuente: (Aceros, 2017)

De la Figura 10 se tomará valores de los materiales con esfuerzos de fluencia más cercanos al esfuerzo admisible calculado, tanto bajo los criterios de Tresca como de Von Mises garantizando un correcto funcionamiento. (Carbono, 2018) Es así que convirtiendo los valores de la Figura 10 a MPa de los elementos seleccionados se tiene en la Tabla 1:

Tabla 1.

Propiedades Mecánicas de los Materiales Seleccionados

Material	Resistencia a la Fluencia	Módulo de Elasticidad
Acero 1018	372 MPa	205 GPa
Acero Inoxidables	298 MPa	192 GPa
Aluminio	275 MPa	72 GPa
Acero A36	248 MPa	205 GPa

Con este proceso de selección previa por medio de criterios utilizados comúnmente en el diseño y construcción de maquinaria industrial, se redujo a tres opciones la posible materia prima.

- Acero Inoxidable
- Aluminio
- Acero A36 (Galvanizado)

Debido a sus propiedades mecánicas (resistencia, maquinabilidad, soldabilidad), en la Figura 11, podemos apreciar las capacidades de maquinado y soldadura de los diferentes metales y aleaciones, otras características que serán tomadas en cuenta en el análisis para la selección de material será la disponibilidad y costo que poseen los materiales más utilizados en la construcción de maquinaria industrial. (MeteqCo, 2014)

Tipo de Metal	Electrodo	MIG	AC - TIG	DC - TIG	CAC-A DC	Plasma
Acero	✓	✓		✓	✓	✓
Acero inoxidable	✓	✓		✓	✓	✓
Aluminio		✓	✓		✓	✓
Fierro fundido	✓				✓	✓
Cobre, latón		✓		✓		✓
Titanio				✓		✓
Aleacion de magnesio			✓			✓
Todos conductivos eléctricos						✓
Nivel de habilidad	Moderato	Bajo	Alto	Alto	Moderato	Bajo
✓ = Recomendado	Procesos de Soldadura				Procesos de Corte	

Figura 11. Procesos de Maquinado y Soldadura de Metales y Aleaciones

Fuente: (MeteqCo, 2014)

Las tablas comparativas sirven para evaluar cada parámetro en función de los demás y poder obtener un porcentaje de referencia sobre los niveles de importancia que ayudaran en la toma de decisiones en los procesos de selección. Con los criterios ya antes mencionadas se evalúa en el sistema fila-columna cada parámetro, luego se realiza la sumatoria de cada fila más el valor de 1, de cada variable evaluada para posteriormente tener una sumatoria total donde obtenemos un porcentaje de cada parámetro permitiendo generar un sistema de prioridad de todos los factores que influyen en cada material o componente.

A continuación, utilizaremos esta metodología como elemento de selección para las diferentes variables que intervienen en el desarrollo de la máquina para la medición de la densidad en listones de madera de balsa.

Se procede a determinar un porcentaje en función del nivel de importancia para cada parámetro que se evaluará, mediante una comparativa de estimación entre las características, de la siguiente forma, ver Tabla 2:

- 0: Si el parámetro no es de importancia en comparación a otro
- 5: Si los parámetros poseen un igual grado de importancia
- 10: Para el parámetro de mayor importancia sobre los demás

Tabla 2.
Porcentaje de Importancia de Parámetros para la Estructura Base

Parámetros	Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)	Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	Soldabilidad	Disponibilidad	Maquinabilidad	Menor Costo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)		5	5	10	5	10	36	23%
Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	5		5	5	5	5	26	17%
Soldabilidad	5	5		5	5	0	21	13%
Disponibilidad	0	5	5		5	5	21	13%
Maquinabilidad	5	5	5	5		5	26	17%
Menor Costo	0	5	10	5	5		26	17%
Total							156	100%

Luego de determinar los porcentajes en los que influye cada parámetro, se procede a mostrar en la Tabla 3, una matriz comparativa que utilizara estos porcentajes para poder seleccionar el material para la estructura base de los tres elementos ya preseleccionados, con la siguiente ponderación:

10: Si es Excelente

5: Si es Muy Bueno

1: Si es Aceptable

Tabla 3.
Selección de Material

Parámetros de Selección	Porcentaje de Importancia	Acero Valor	Inoxidable Total	Aluminio Valor	Total	Acero Valor	Galvanizado Total
Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)	23%	1	0.23	10	2.3	5	1.15
Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	17%	10	1.7	5	0.95	10	1.7
Soldabilidad	13%	10	1.3	5	0.65	10	1.3
Disponibilidad	13%	5	0.65	5	0.65	10	1.3
Maquinabilidad	17%	10	1.7	10	1.7	10	1.7
Menor Costo	17%	1	0.17	5	0.85	10	1.7
		Total	5.68	Total	7.00	Total	8.85

Por lo tanto, se tiene qué para el diseño de la estructura base, seleccionado como material al Acero, ya que cumple con la soldabilidad, disponibilidad y demás características facilitando los procedimientos a ser realizados durante su manufactura.

Una vez elegida la materia prima para la estructura base, se procede a la etapa de diseño mecánico para la misma, se considerara los requerimientos hechos por la empresa para el dimensionamiento físico del mismo.

- Area de Trabajo Máximo de 300x300 mm
- Forma Regular que asegure una medicion estable
- Sujecion Fija antideslizante

Tomando en cuenta estos requerimientos, se establece el siguiente diseño:

- Area de Trabajo Util de 250x250x mm

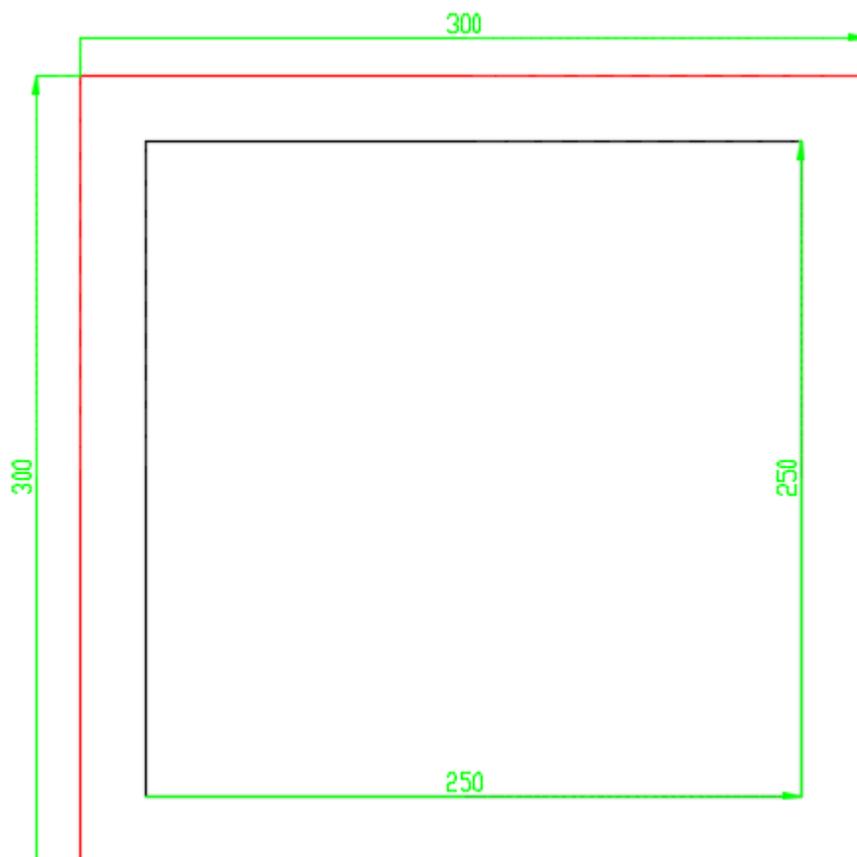


Figura 12. Área de Trabajo

- Color Negro: Area de Trabajo
- Color Rojo: Zona Maxima de Operación Solicitada

En la Figura 12 se puede apreciar que se tomo un área de trabajo de 250x250 mm, que esta dentro del zona solicitada (300x300 mm), ya que genera un espacio suficiente de operación en base a los listones de madera con los que se trabajará.

- Forma Regular Cuadrada

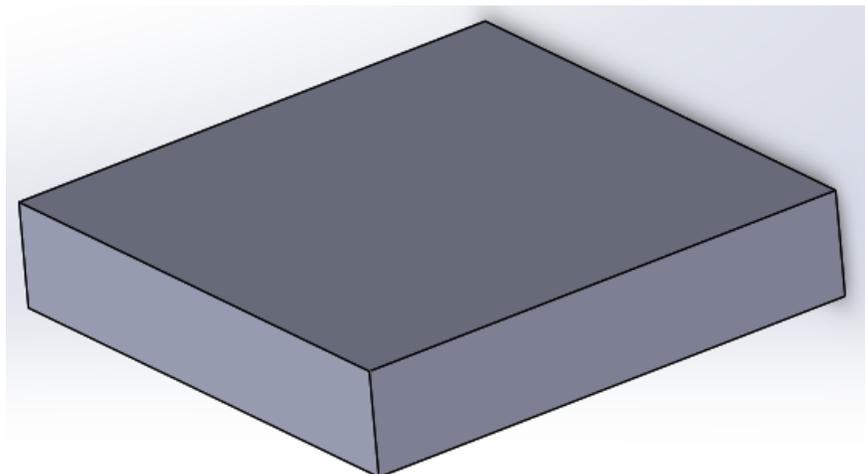


Figura 13. Forma de la Base

En la Figura 13, se puede apreciar la forma de la base que se determinó, se eligió una forma regular cuadrada ya que tiene un mayor área de contacto (entre el plato de la estructura base con los listones de madera), asegurando una mejor estabilidad en la medición de la densidad en los listones de madera de balsa.

A continuación en la Figura 14 podemos observar el área de contacto con una base cuadrada, mientras que en la Figura 15 apreciamos el área de contacto con una base circular. Ambas bases tienen como medida de largo y diámetro respectivamente de 250 mm.

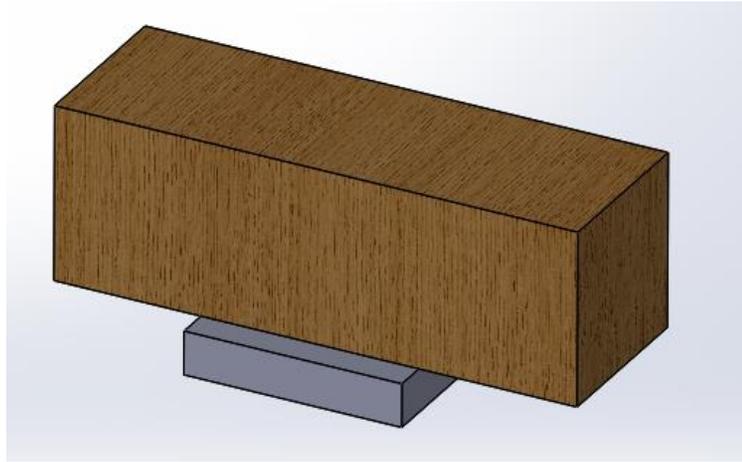


Figura 14. Forma de la Base Cuadrada

Area de Contacto: $250\text{mm} \times 250\text{mm} = 62500 \text{ mm}^2$

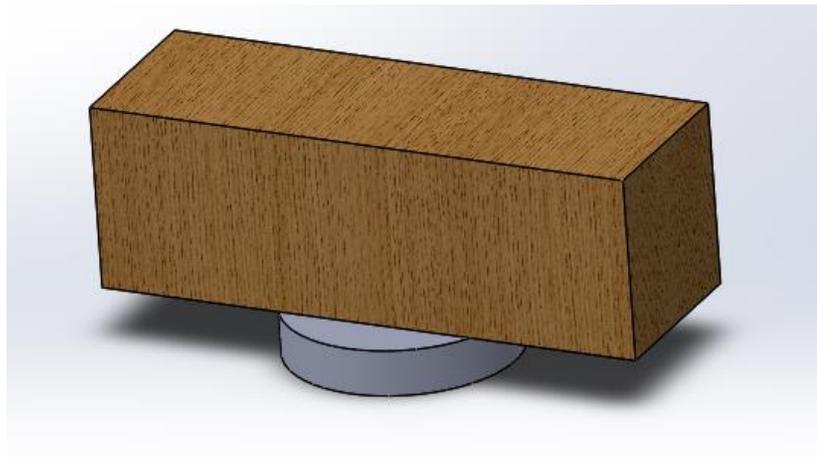


Figura 15. Forma de la Base Redonda

Area de Contacto: $(3,1416 \cdot (250\text{mm})^2) / 4 = 49087.39 \text{ mm}^2$

- Con elementos antideslizantes en las patas de apoyo, se genera una fricción entre la máquina medidora de la densidad y la mesa de trabajo.

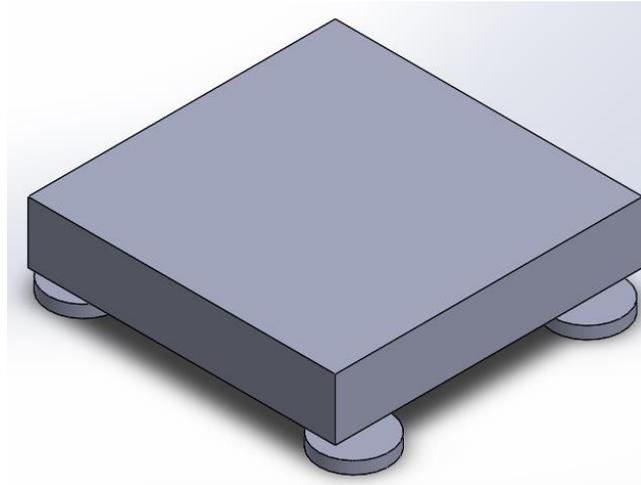


Figura 16. Estructura Base

Procedemos a calcular el coeficiente estático y dinámico que debe tener los elementos antideslizantes en la base de apoyo.

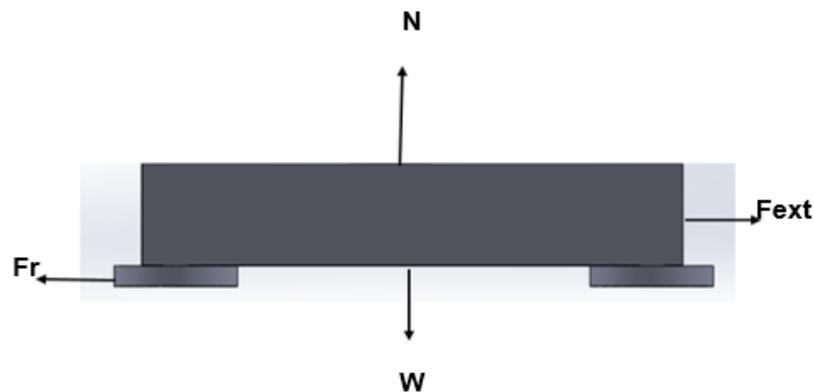


Figura 17. Diagrama Cuerpo Libre de la Estructura Base

Con el diagrama de cuerpo libre que se representa en la Figura 17, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_x = F_{ext} - F_{fricción} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$\sum F_y = N - W \quad \text{Ecuación (15)}$$

Al tratarse de un análisis estático las sumatorias de fuerzas en “x” e “y” es igual a 0. Por lo tanto las ecuaciones 3 y 4 quedarían de la siguiente manera:

$$0 = F_{ext} - F_{fricción} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$F_{ext} = F_{fricción} \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$0 = N - W \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$N = W \quad \text{Ecuación (19)}$$

Para el cálculo del coeficiente de la fricción estática, utilizaremos la ecuación 9, que relaciona la normal con la fuerza de fricción:

$$F_{fricción} = u_e * N \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde: u_s : Coeficiente de fricción estática

N: Fuerza Normal

$F_{fricción}$: Fuerza de Fricción

Mediante el uso de dinamómetros (Mkele SP-500), balanzas (Balanza Electrónica Torrey 20 kg con 2 gr. De Precisión) y elementos de medición (Calibrador de Tornillo Dual Stanley 78-201, Flexómetro Stanley de 5 metros) se obtiene los siguientes datos:

$$m = 4 \text{ kg}$$

$$F_{ext} = 25 \text{ N}$$

Por lo tanto, si operamos las ecuaciones 7, 8 y 9 tenemos:

$$F_{ext} = F_R = u_e * N \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$F_{ext} = u_e * W \quad \text{Ecuación (22)}$$

$$F_{ext} = u_e * m * g \quad \text{Ecuación (23)}$$

Si de la expresión obtenida en la ecuación 12, despejamos el coeficiente de fricción estático tenemos:

$$u_e = \frac{F_{ext}}{mg} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Reemplazado los datos obtenidos por los equipos de medición, calculamos el coeficiente de fricción estática.

$$u_e = \frac{25 \text{ N}}{4 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$u_e = 0,637$$

Revisando las tablas referenciales de coeficiente de fricción estática en la Figura 18 que se presenta en el Libro de Física 3, III Semestre de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se corrobora el valor antes mencionado ya que en la misma se detalla que el coeficiente de fricción estática entre cauchos y madera comunmente se encuentran en el valor de 0,6. (Salazar, 2012)

Material de las superficies.	μ
Roble sobre roble.	0.25
Hule sobre concreto.	0.70
Metales sobre roble.	0.55
Pino sobre pino.	0.35
Acero sobre acero.	0.18
Superficies engrasadas.	0.05
Hierro sobre concreto.	0.30
Cuero sobre metales.	0.56
Hule sobre roble.	0.46
Acero sobre babbit.	0.14

Figura 18. Valores Medios de Coeficientes de Fricción
Fuente: (Salazar, 2012)

Para asegurar un correcto funcionamiento de los cauchos antideslizantes se dividirá en los 4 puntos referenciales de la base para tener un equilibrio estático de la maquina. (Vikingo, 2018)

Con un área de trabajo de 48400 mm^2 y un peso de 4kg se determina que el diámetro para cada apoyo será:

$$D_{\text{apoyo}} = 57 \text{ mm}$$

$$D_{\text{caucho}} = 51 \text{ mm}$$

Las area de trabajo para cada apoyo y caucho serán por lo tanto:

$$A_{\text{apoyo}} = ((57 \text{ mm})^2 * 3,1416) / 4 = 2551,76 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{caucho}} = ((51 \text{ mm})^2 * 3,1416) / 4 = 2042.82 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto tenemos un area util de trabajo para la base de 48400mm², con apoyos de 2551,76 mm². El espesor de los cauchos antideslizantes tiene una méddida de 1/8 (3,175 mm).

En la Figura 19, observamos el área de trabajo que se tiene para la base una vez implementada los elementos antideslizantes.

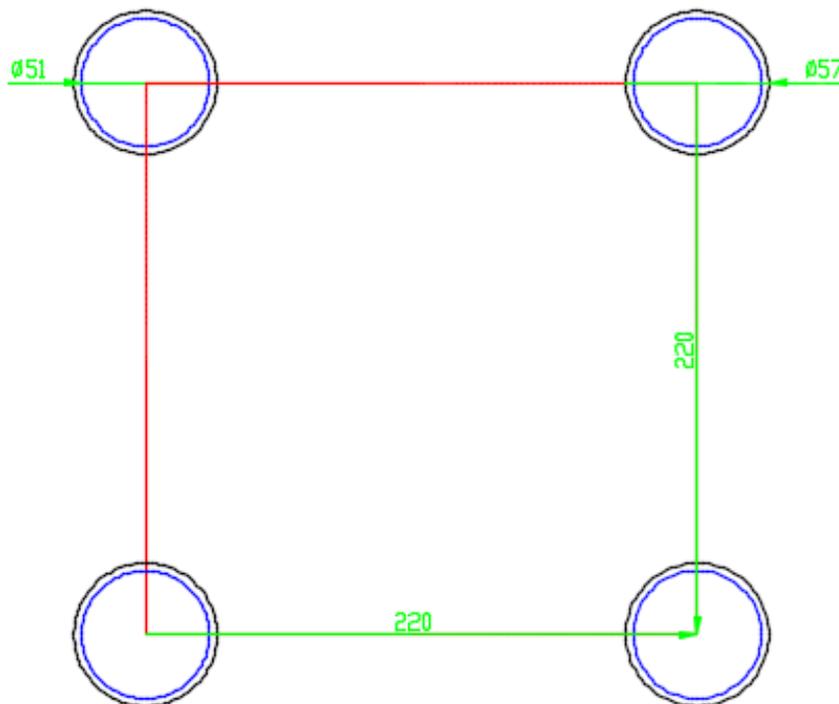


Figura 19. Área de Trabajo de los Antideslizantes

- Rojo: Area de Trabajo
- Negro: Apoyo base
- Azul: Caucho antideslizante

El uso de gomas, elastómeros u otro tipo de material que evite deslizamientos en la plataforma de la maquina con respecto a la superficie del espacio donde sera colocada cuando esta en operación el equipo. (SAC, 2018)

Se tiene un plato de 250x250 mm², con un área para el módulo de pesaje de 220x220 mm², es decir tenemos una zona de 30 mm cuadrados como zona deslizante, esta área será ocupada por los elastómeros de 14 mm de largo en forma de cono para mejorar la estabilidad. (Cabot, 2018)

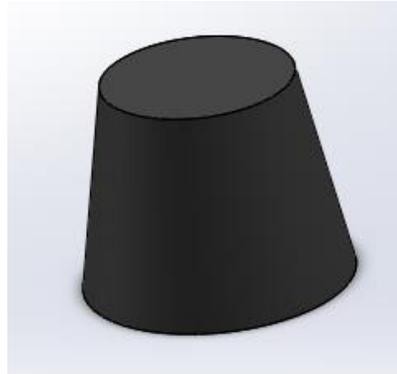


Figura 20. Elastómeros

Ahora realizamos el mismo procedimiento que se desarrollo en la estructura base, pero ahora para la selección del material a utilizar en la manufactura del brazo soporte. Determinando un porcentaje en función del nivel de importancia para cada parámetro que se evaluara, mediante una comparativa de estimación entre las características, de la siguiente forma, ver Tabla 4:

- 0: Si el parámetro no es de importancia en comparación a otro
- 5: Si los parámetros poseen un igual grado de importancia
- 10: Para el parámetro de mayor importancia sobre los demás

Tabla de Dureza Brinell (HB) de Materiales	
Material	Dureza Brinell
Aluminio	20 HB
Cobre	35 HB
Acero (blando)	120 HB
Acero inoxidable	250 HB
Acero de herramientas	500 HB
Madera	entre 1 - 7 HB
Níquel	90 HB
Aleaciones de Níquel	entre 95 - 476 HB
Vidrio	482 HB
Magnesio, cinc, latón fundido	entre 11 - 158 HB
Metales antifricción	entre 6 - 78 HB
Plomo, estaño, soldadura blanda	entre 3 - 39 HB

Figura 21. Dureza Brinell de los Materiales
Fuente: (Ingemecánica, 2019)

Al igual que para la estructura base, se realiza una preselección de materiales considerando propiedades mecánicas (Resistencia de Fluencia, Módulo de Elasticidad y Dureza) disponibilidad y costos. Estos materiales son:

- Acero Inoxidable
- Aluminio
- Acero 1018

Tabla 4.
Porcentaje de Importancia de Parámetros para el Brazo-Apoyo

Parámetros	Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)	Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	Dureza (10 a 250 HB)	Disponibilidad	Maquinabilidad	Menor Costo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)		5	5	5	5	10	31	19%
Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	5		5	5	5	5	26	17%
Dureza (10 a 250 HB)	5	5		5	5	5	26	17%
Disponibilidad	5	5	5		5	5	26	17%
Maquinabilidad	5	5	5	5		5	26	17%
Menor Costo	0	5	5	5	5		21	13%
Total							156	100%

Ahora mostraremos la Tabla 5, una matriz comparativa que se utilizará para poder seleccionar el material para la estructura base, para lo cual tenemos la siguiente ponderación:

10: Si es Excelente

5: Si es Muy Bueno

1: Si es Aceptable

Tabla 5.
Selección de Material

Parámetros de Selección	Porcentaje de Importancia	Acero Valor	Inoxidable Total	Aluminio Valor	Total	Acero Valor	1018 Total
Resistencia de Fluencia (5 a 300 Mpa)	19%	10	1.9	5	0.95	10	1.9
Elasticidad (Mayor a 50 GPa)	17%	10	1.7	5	0.85	10	1.7
Dureza	17%	10	1.7	1	0.17	5	0.85
Disponibilidad	17%	5	0.85	5	0.85	10	1.7
Maquinabilidad	17%	10	1.7	10	1.7	10	1.7
Menor Costo	13%	1	0.13	5	0.65	5	0.65
		Total	7.98	Total	5.17	Total	8.5

Por lo tanto, tenemos como resultado de la Tabla 5, que para el diseño del brazo-soporte, seleccionamos como material al Acero 1018, ya que cumple de mejor manera la maquinabilidad, dureza y demás características facilitando los procedimientos a ser realizados durante su manufactura.

Una vez elegida la materia prima para el brazo-apoyo, se procede a la etapa de diseño mecánico para el mismo, se considerara los requerimientos hechos por la empresa para el dimensionamiento físico del mismo.

- Longitud de Trabajo Máximo de 250 mm
- Forma Regular que asegure una medición estable
- Sujeción fija antideslizante

Tomando en cuenta estos requerimientos, se establece para el diseño del brazo-apoyo una longitud de Trabajo máximo de 250 mm y espesor máximo de 10 mm.

Para dicho diseño, se tiene que considerar que debe tener dos perforaciones, (una para el sensor de distancia y otra para el tubo/eje que sirva para conectar la base con el brazo). Por lo tanto tenemos el siguiente prototipo:

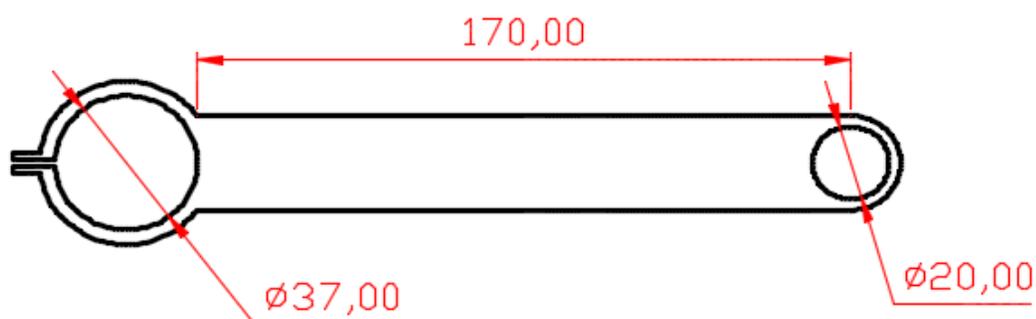


Figura 22. Área de Trabajo Brazo-Apoyo

En la Figura 22 se puede apreciar que se tomo un área de trabajo de 231x50 mm, que esta dentro del zona solicitada (250x50 mm), ya que genera un espacio suficiente de operación para la lectura de datos por parte del sensor de distancia. Debido al análisis desarrollado al inicio de este capítulo donde se tomo como una condición inicial el valor medio de espesor igual a 4.5 mm se determina que el grosor que debe tener el Brazo-Apoyo sea de 9 mm ya que cumple con los requisitos de esfuerzos admisibles, garantizando un correcto funcionamiento de esta parte del subsistema mecánico, como otras características se tiene un peso ligero pero resistente para la aplicación que esta siendo diseñado. (Calvopiña, 2013)

- Forma Regular Cuadrada

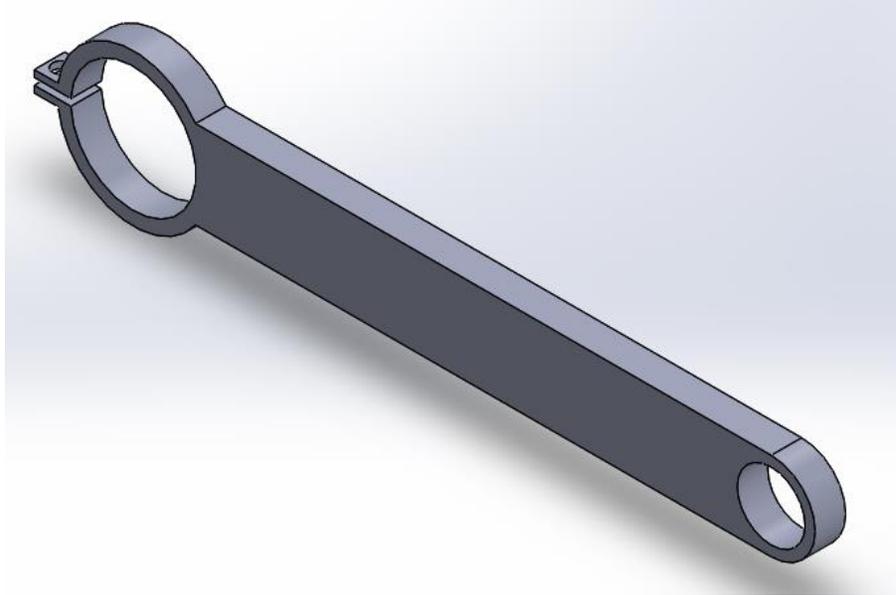


Figura 23. Forma del Brazo-Apoyo

En la Figura 23, se puede apreciar la forma del brazo-apoyo que se determinó, se eligió una forma regular lisa, con puntas redondeadas para evitar esquinas puedan provocar picaduras o cortaduras en los operarios u otras personas, con una sujeción posterior al eje que une la base y el brazo-apoyo asegurando una mejor estabilidad en la medida de la densidad en los listones de madera de balsa.

Ahora se procede al análisis de estático donde podemos apreciar la fuerza cortante y el momento flector que se genera entre el “Brazo-Apoyo” y el tubo/eje que conecta con la “Estructura-Base” del equipo de medición:

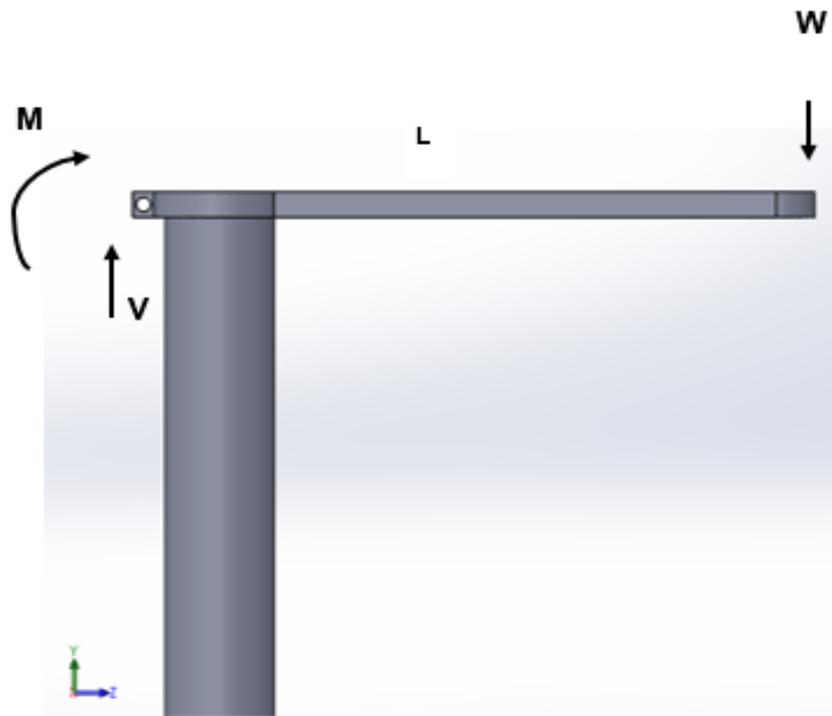


Figura 24. Diagrama de Cuerpo Libre Brazo-Apoyo

Donde: V: Fuerza cortante (Reacción)

L: Distancia desde el punto de referencia hasta W

W: Peso generado por el sensor de distancia

M: Momento flector generado

Con el diagrama de cuerpo libre que se representa en la ilustración 24, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_y = V - W \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$\sum M = M + W \cdot L \quad \text{Ecuación (26)}$$

Al tratarse de un análisis estático las sumatorias de fuerzas en “y” y la sumatorio de momentos es igual a 0. Por lo tanto las ecuaciones 15 y 16 quedarían de la siguiente manera:

$$0 = V - W \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$0 = M + W * L \quad \text{Ecuación (28)}$$

Mediante el uso de flexómetros (Flexómetro Stanley de 5 metros), elementos de medición (Calibrador de Tornillo Dual Stanley 78-201), balanzas (Balanza Electrónica Torrey 20 kg con 2 gr. De Precisión) se obtiene los siguientes datos:

$$m = 35 \text{ gr.}$$

$$L = 231 \text{ mm}$$

Por lo tanto si operamos las ecuaciones 17 y 18 con los datos obtenidos:

$$V = W = (0.035 \text{ kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$V = 0.3434 \text{ N}$$

$$M = -W * L = (0.035 \text{ kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.231 \text{ m}$$

$$M = -0.0793 \text{ N} * \text{m}$$

DIN ISO 272	Paso Rosca	Llave e/c	Calidad 6.8	Calidad 8.8	Calidad 10.9	Calidad 12.9
	mm	mm	Par apriete M [N·m]	Par apriete M [N·m]	Par apriete M [N·m]	Par apriete M [N·m]
M3	0,5	5,5	1,1	1,3	1,8	2,2
M4	0,7	7	2,6	3	4,3	5,1
M5	0,8	8	5,1	6	8	10
M6	1	10	8	10	15	18
M8	1,25	13	22	26	35	42
M10	1,5	16	42	50	71	85
M12	1,75	18	74	87	123	147
M14	2	21	117	138	194	235
M16	2	24	179	211	299	358
M18	2,5	27	246	289	412	490
M20	2,5	30	384	412	579	696
M22	2,5	34	471	559	785	941
M24	3	36	598	711	1000	1196
M30	2,5	46	1206	1422	2010	2403

Figura 25. Valores de Par-Apriete de los Tornillos Comerciales

Fuente: (UTILCELL, 2017)

Con los valores de Par-Apriete de la Figura 25, se puede concluir que para garantizar la sujeción en la union del eje (tubo redondo de 1 – ½ pulgada) con el brazo-apoyo, un tornillo M3 es mas que suficiente ya que incluso en la calidad menor (Calidad 6.8) tenemos un Par-Apriete igual a 1.1 N-m, que es muy superior al necesario en esta junta (0.0793 N-m). (UTILCELL, 2017)

Con los valores obtenidos al inicio del diseño de esfuerzos admisibles para el brazo-apoyo es posible determinar un factor de seguridad:

Factor de Seguridad:

$$n = \frac{372 \text{ MPa}}{5.076 \text{ MPa}} = 73.2$$

Ecuación (29)

Ahora realizaremos un análisis del brazo-apoyo, para observar una validación al desarrollo del diseño planteado. En la Figura 26, podemos apreciar que los esfuerzos máximos de tensión que soportara el brazo (11.67 MPa) están por muy debajo del límite elástico (372 MPa) que posee el material antes de llegar a la zona plástica o zona de fractura.

Si sacamos un factor de seguridad, se tiene:

$$n = \frac{372 \text{ MPa}}{11.67 \text{ MPa}} = 31.87 \quad \text{Ecuación (30)}$$

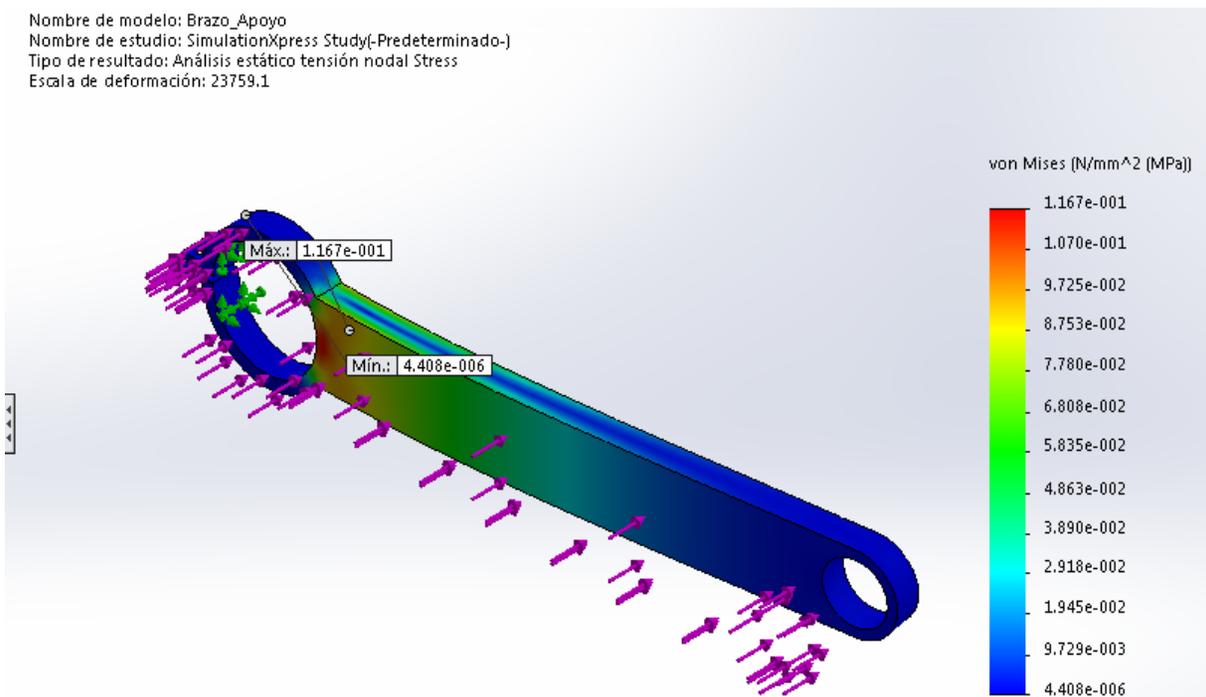


Figura 26. Análisis de Esfuerzos del Brazo Soporte

Se puede observar que los datos del esfuerzo calculado se acercan a los valores mínimos de esfuerzos admisibles en la simulación, esto se debe a que el software considera un concentrador de esfuerzos mostrando el punto más crítico del brazo-apoyo, mientras que en el análisis matemático efectuado no considero este aspecto.

Analizando este detalle es posible determinar un factor de correlación entre los valores del esfuerzo admisible calculado y los valores de esfuerzos admisibles mínimos obtenidos en la simulación.

$$\text{Factor Correlación} = \frac{5.076 \text{ MPa}}{4.408 \text{ MPa}} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$\text{Factor Correlación} = 1.15$$

Como se puede apreciar existe una correlación de un poco mas de 1, lo que significa que los valores presentados a lo largo del desarrollo del diseño si son acertados.

Una vez definido los parámetros más importantes del subsistema mecánico, es necesario definir algunos parámetros extras para garantizar que la medición de la densidad se la realice con una precisión adecuada, dichos parámetros a evaluar son:

- Nivel paralelo entre la base y el brazo soporte
- Compensación de pesaje
- Resistencia al polvo

a) Nivel paralelo entre plato y brazo soporte:

Se debe considerar que el plato base y el brazo soporte deben tener un nivel paralelo ya que el primero es una referencia de medida para el segundo. Por lo que si no se cumple con este requerimiento se producirá un triángulo rectángulo en la adquisición de datos por parte del sensor de distancia, lo que conlleva una pérdida de precisión en esta etapa y que afectará la medición final. Como herramienta de control se usará un nivel.

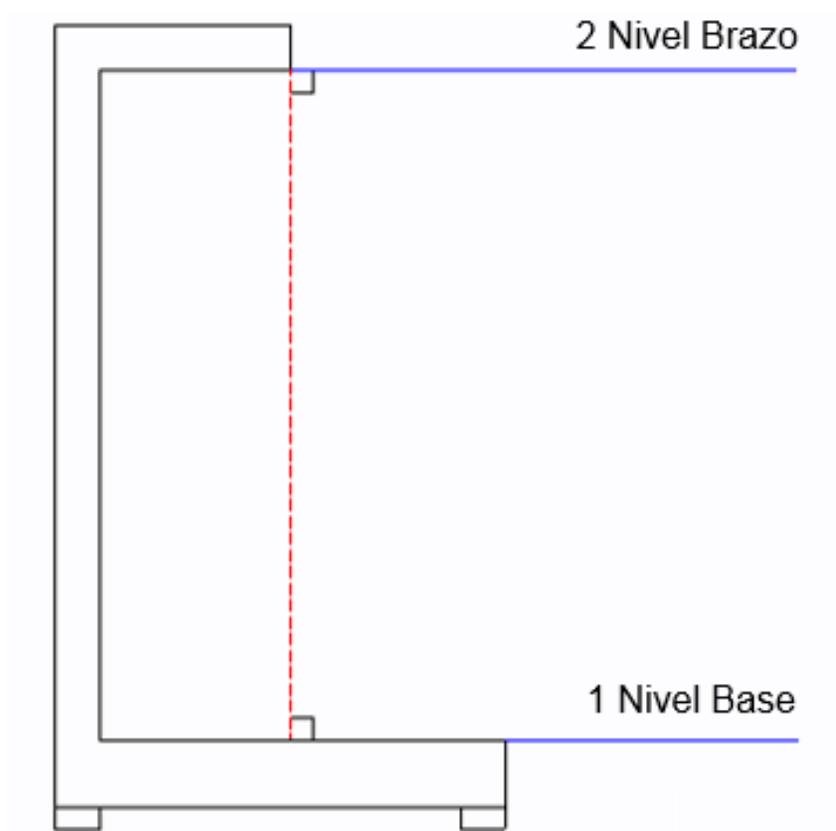


Figura 27. Paralelismo entre la base y el brazo

b) Compensación de pesaje:

La celda de carga aparte de requerir un transmisor que garantice la amplificación de señal adquirida, necesita también de una estructura metálica (módulo de pesaje) que asegure la repetitividad y sensibilidad del dato tomado. Por lo tanto, este debe fijar la celda de carga de tal manera que satisfaga lo antes mencionado.

Al igual que en el brazo-apoyo establecemos un prototipo en base a los requerimientos que se tiene y a la forma regular y dimensiones que se han ido desarrollando a lo largo del diseño buscando que los esfuerzos se dividan correctamente a lo largo del módulo de pesaje. En la Figura 28, se muestra dicho prototipo:

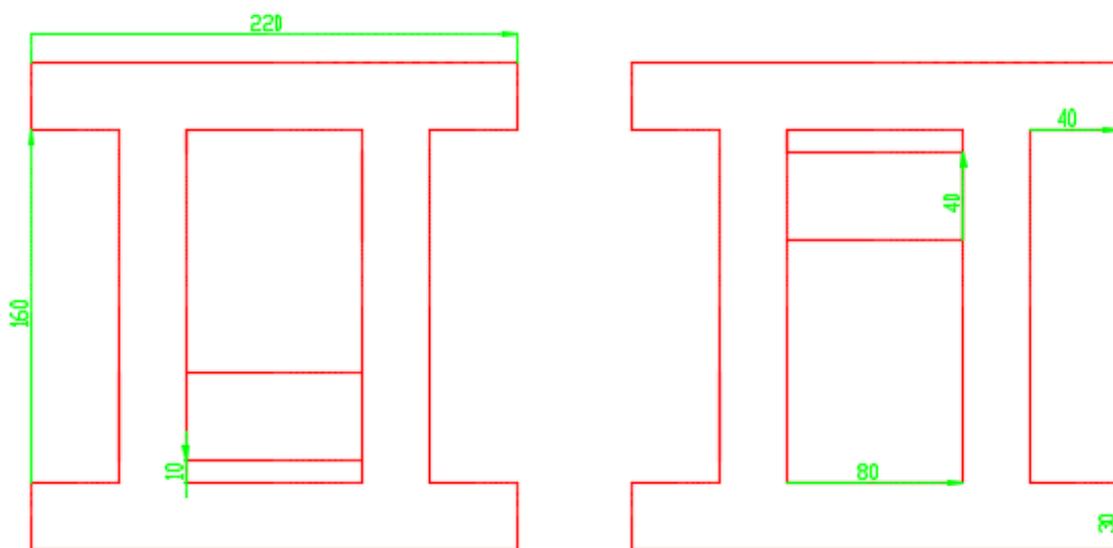


Figura 28. Módulo de Pesaje

Se tiene el módulo de pesaje conformado en dos partes debido a que se buscara compensar por ambos lados a la celda de carga, como dos apoyos en una viga sometida a flexión. Se procede a calcular el factor de seguridad con el material seleccionado (Acero A36) que tiene un Esfuerzo de Fluencia de 248 MPa y el esfuerzo admisible obtenido al iniciar el diseño del subsistema mecánico:

Factor de Seguridad:

$$n = \frac{248 \text{ MPa}}{4.031 \text{ MPa}} = 6.15$$

Este elemento también debe someterse a un análisis mecánico por software para validar el diseño presentado anteriormente (CAE), ya que es una parte fundamental para conseguir una buena estabilidad en la adquisición de información por parte de la celda de carga, a diferencia del Brazo-Soporte, el módulo de pesaje soportara cargas variables desde 1 gramos hasta 6 kg como máximo, sin embargo no solo debe soportar dicha carga, sino que como ya se mencionó anteriormente debe generar un ambiente de estabilidad lo más ideal que sea posible para una correcta lectura en la etapa de censado de peso, es decir debe compensar toda el área de trabajo que tendrá la máquina. En la Figura 29, podemos apreciar el análisis que se logró desarrollar mediante simulación por parte de una herramienta computacional, tenemos como esfuerzo máximo que soportara la celda (26.91 MPa), están por muy debajo del límite elástico (248 MPa) que posee el material antes de llegar a la zona plástica o zona de fractura.

Si sacamos un factor de seguridad, se tiene:

$$n = \frac{248 \text{ MPa}}{26.91 \text{ MPa}} = 9.21$$

Esto quiere decir que el material no presentara ningún tipo de problemas ya que el factor de seguridad que se tiene es igual a 921.6, cabe recalcar que, aunque parezca un sobredimensionamiento el valor en el factor de seguridad es elevado debido a que las cargas que soportara son bastante pequeñas y los aceros poseen esfuerzos de fluencia capaces de soportar cargas bastante elevadas.

Nombre de modelo: modulo_de_pesaje
 Nombre de estudio: SimulationXpress Study(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Stress
 Escala de deformación: 222066

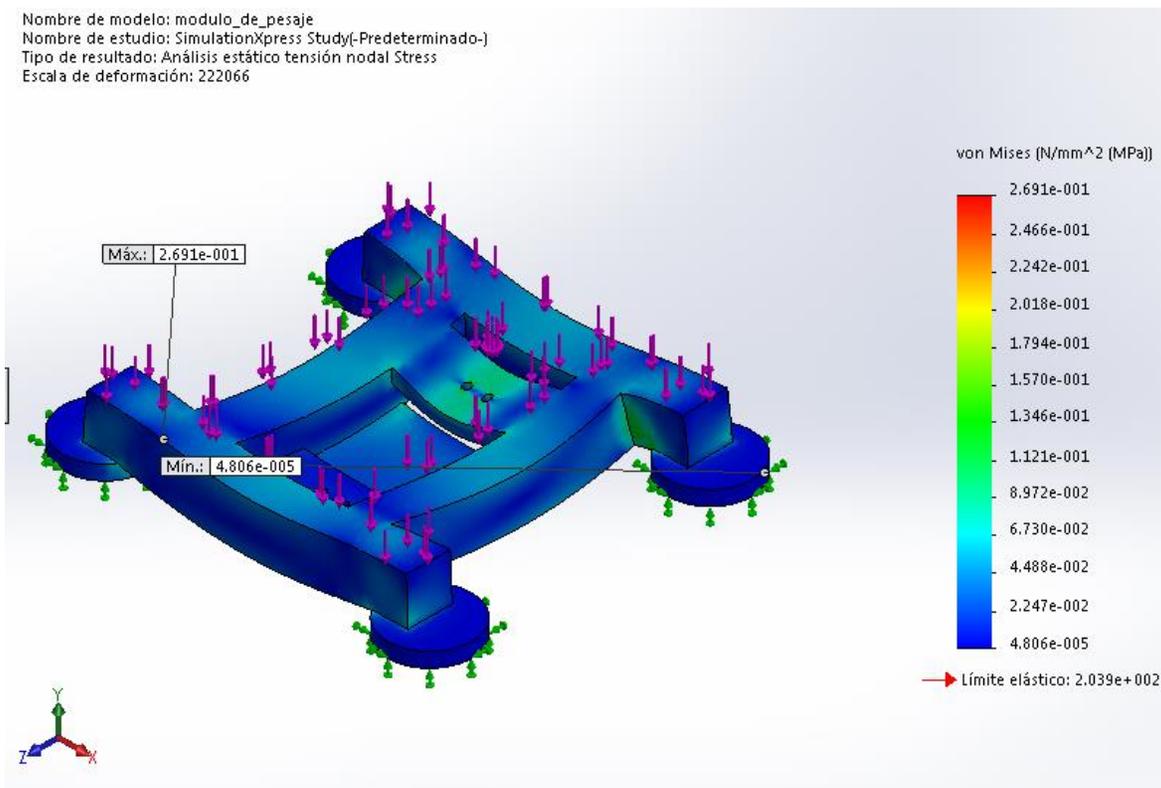


Figura 29. Análisis de Esfuerzos del Módulo de Pesaje

Podemos observar que los datos del esfuerzo calculado se acercan a los valores mínimos de esfuerzos admisibles en la simulación, esto se debe a que el software considera un concentrador de esfuerzos mostrando el punto más crítico de la estructura-base, mientras que en el análisis matemático efectuado no considero este aspecto.

$$\text{Factor Correlación} = \frac{4.031 \text{ MPa}}{4.806 \text{ MPa}}$$

$$\text{Factor Correlación} = 0.84$$

Al tener un factor de correlación cercano a 1, se puede verificar que los datos que se obtuvieron en el diseño son acertados ya que son similares a los resultados obtenidos en el software de simulación.

Una vez definido toda la estructura que se tendra en la base podemos observar un modelo mas realista de la misma donde se implementará los cauchos antideslizantes anteriormente diseñados.

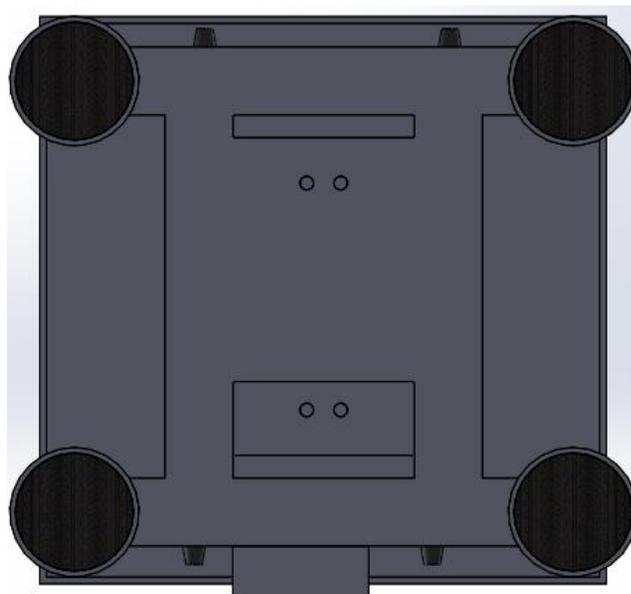


Figura 30. Elementos Antideslizantes Implementados

En la Figura 30 se puede apreciar la implementación de los elastómeros en la estructura base.

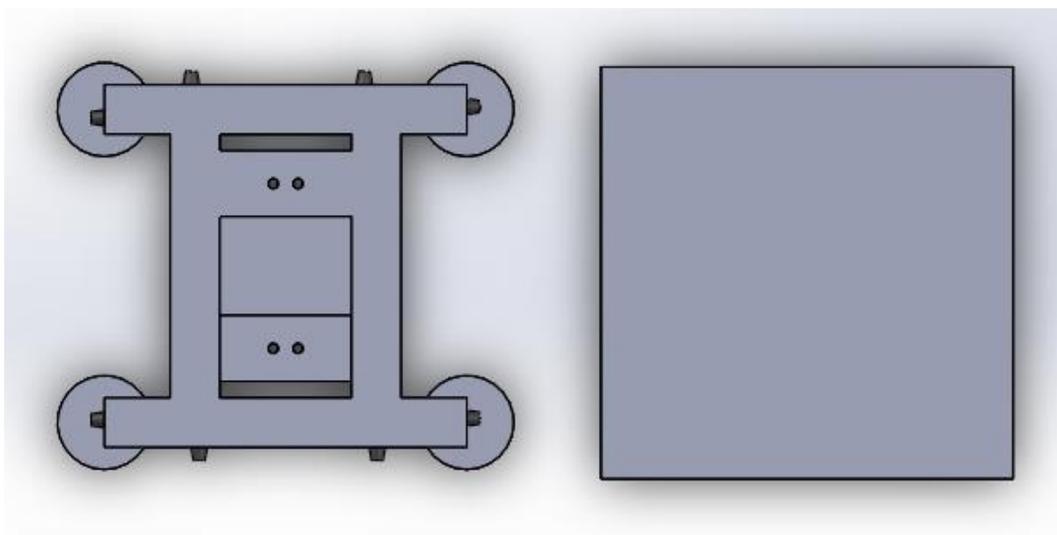


Figura 31. Implementación de Elastómeros

Para evitar vibraciones entre el plato y el módulo de pesaje que pudiesen afectar la medida de la celda de carga, se usaron elastómeros en las esquinas, asegurando la estabilidad del conjunto. En la Figura 31, se muestra la implementación del módulo de pesaje.

c) Resistencia al Polvo:

La mayoría de aceros no tienen ningún tipo de problema de operar en un ambiente maderero, es decir un entorno con bastante polvo, por lo que dicha resistencia se aseguró al momento de seleccionar el material (Acero A36 y Acero 1018).

Manufactura:

Los procesos de manufactura que se emplearán para esta etapa del diseño mecánico, se dividen en dos procesos principales torneado y soldadura.

Torneado:

Es un proceso de mecanizado de uso muy común ya que funciona mediante el arranque de la viruta de la pieza. Pasando por la parte inicial del material, la misma que es eliminada dándole la forma que se dese a la pieza. La máquina que realiza este proceso se lo conoce como “torno” y existen una variedad de tipos de tornos.



Figura 32. Proceso de Torneado

Fuente: (Alicante, 2014)

Soldadura: La soldadura, se basa en la unión de dos elementos: lo más común es que se lo realice a través de la fusión. Por lo general se añade un plástico o un metal que, cuando se funde, provoca la unión de ambas piezas. Este material (electrodo) que se agrega es la que provoca que la unión quede luego de enfriarse.



Figura 33. Proceso de Soldadura

Fuente: (Porto, 2014)

Para la estructura base, se tienen procesos de torneado y doblado para la conformación del plato, patas de la base apoyo y el módulo de pesaje.

Además de los procesos de soldadura, para el conformado entre la base y el eje.

Para el brazo-apoyo se tiene un proceso de mecanizado por medio del torno CNC, ya que tiene una forma única.

Tabla 6.
Procesos de Manufactura Realizados

Material Prima	Proceso	Parte Obtenida	Código	Elemento de Control
Acero A36	Mecanizado CNC	Base	1	Nivel
Acero A36	Mecanizado CNC	Plato Base	2	Nivel
Polímero	Corte	Elastómero	3	Supervisión Visual
Polímero	Corte	Antideslizantes	4	Nivel
Acero A36	Mecanizado CNC	Unión (Tubo-Base)	5	Nivel
Acero A36	Corte	Tubo 1 ½"	6	Nivel
Acero 1018	Mecanizado CNC	Brazo-Apoyo	7	Nivel
Acero	-	Tornillo M3	8	-
	Soldadura	Unir 5 y 1		Inspección Visual
	Perforación	Unir 3 y 1		Inspección Visual

3.2.3 Materiales:

Metales:

- Acero A36 Galvanizado
- Tubo Acero A36 de 1 ½ pulgada

Polímeros:

- Elastómeros
- Cauchos Antideslizantes

Manufactura:

- Torno
- Soldadura

Elementos de Control:

- Nivel
- Escuadra

3.3 Diseño del Subsistema Electrónico:**3.3.1 Requerimientos:**

El subsistema electrónico se diseña para brindar precisión y seguridad a los sensores contra perturbaciones externas, además de garantizar un correcto funcionamiento gracias a las debidas protecciones eléctricas que debe tener el prototipo.

3.3.2 Diseño:

Siguiendo la norma IP66-67 para el diseño eléctrico en maquinaria industrial y basándose en los requerimientos se establece un esquema del diseño a implementar.

- Tablero de Control
- Sensor de Distancia
- Celda de Carga
- Transmisor de Peso

Para obtener la densidad con una precisión adecuada, se debe tener una estructura eléctrica que brinde precisión y robustez. Los parámetros que influyen son:

- Protecciones del Tablero de Control
- Selección de Sensor de Distancia
- Selección de la Celda de Carga
- Selección del Transmisor de Peso

a) Protección de Seguridad del Tablero:

Las protecciones en cualquier sistema eléctrico/electrónico es muy importante a considerar, al tener una fuente de voltaje que alimentara algunos elementos como el transmisor de señal y el PLC, se debe garantizar las debidas seguridades que aseguren el funcionamiento frente a todos los casos posibles.

Datos Iniciales:

P: Potencia de la Fuente Logo: 125 W

V: Voltaje del tomacorriente: 120 V

Factor de Potencia: $\cos\emptyset = 0.96$

Procedemos a calcular el ángulo de fase, a partir del factor de potencia que se brindó en la empresa y que fue certificado por la empresa que regula este tipo de estándares de calidad en el país.

$$\cos\emptyset = 0.96$$

$$\emptyset = \cos^{-1}(0.96)$$

$$\emptyset = 16.26^\circ$$

Con este valor obtenido, procedemos al cálculo de la corriente que va a circular por la línea de abastecimiento. (Martínez, 2014)

$$I = \frac{P}{V * \cos\phi} \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$I = \frac{125 \text{ W}}{120 \text{ V} * \cos(16.26^\circ)}$$

$$I = 1,09 \text{ A}$$

Con la corriente de entrada que va a circular por la fuente seleccionamos las protecciones y cable acorde a lo obtenido. Como la carga que se va a proteger es netamente resistiva, se recomienda que la protección cumple con la siguiente desigualdad.

$$1.45 * I \leq I_z \leq 2,6 * I \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$1.45 * 1.09 \leq I_z \leq 2.6 * 1.09 \text{ A}$$

$$1.58 \text{ A} \leq I_z \leq 2.83 \text{ A}$$

Una vez seleccionada el rango de corriente que va a circular por el tablero de control, pasamos a la selección del tipo de cable, así como la sección que debe tener, en la Figura 28, podemos apreciar los diferentes tipos de cableado a utilizar.

Número AWG	Diámetro de mm	Sección en mm ²	Número de espiras x cm	Kg. por kilómetro	Resistencia en Ω por Km	Corriente en Amperios
0000	11,86	107,2	-	-	0,168	319
000	10,40	85,3	-	-	0,197	240
00	9,226	67,43	-	-	0,252	190
0	8,252	53,48	-	-	0,317	150
1	7,348	42,41	-	375	0,40	120
2	6,544	33,63	-	295	0,40	96
3	5,827	26,67	-	237	0,63	78
4	5,189	21,15	-	188	0,80	60
5	4,621	16,67	-	149	1,01	48
6	4,115	13,30	-	118	1,27	38
7	3,665	10,55	-	94	1,70	30
8	3,264	8,36	-	74	2,03	24
9	2,906	6,63	-	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	-	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	-	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	-	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	-	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92

Figura 34. Tipos de Cables AWG
Fuente: (Ingelcom, 2014)

Es así que, con los cálculos obtenidos, anteriormente más las secciones de la Figura 34, los elementos a utilizar serán:

- Fusibles Cerámicos 10x38 3 A
- Portafusibles
- Cable AWG Flexible 17-21

b) Selección del Sensor de Distancia:

El sensor de distancia debe cumplir con la función de adquirir una señal estable que permita un posterior procesamiento garantizando la precisión del dato tomado. El alcance que debe tener el sensor debe ser de 0 a 70 cm mínimo, ya que el espesor de los listones en promedio oscila entre los 0 y 60 cm. El polvo no debe afectar su funcionamiento, para realizar este procedimiento de mejor manera nos apoyaremos con matrices de selección como las que se usó en la etapa de subsistema mecánico. (OMRON, 2018)

Al igual que en el sistema mecánico, se realizará una preselección analizando costos, características y disponibilidad, reduciendo las opciones a tres, como lo son:

- Sensor Ultrasónico
- Sensor magnético
- Sensor Láser

Se determinará un porcentaje en función del nivel de importancia para cada parámetro evaluado, para después mediante una comparativa de estimación entre las características, seleccionar el material a continuación los valores con los que se iniciará este proceso, ver Tabla 13:

- 0: Si el parámetro no es de importancia en comparación a otro
- 5: Si los parámetros poseen un igual grado de importancia
- 10: Para el parámetro de mayor importancia sobre los demás

Tabla 7.
Porcentaje de Importancia de Parámetros para Sensor de Distancia

Parámetros	Rango de Detección (0 a 700 mm)	Precisión (al menos 5%)	Tiempo de Respuesta	Disponibilidad	% de Linealidad	Menor Costo	Trabaja con el Nivel de Ruido (70 dB)	$\Sigma+1$	Porcentaje	
Rango de Detección (0 a 700 mm)		5	5	5	10	10	5	41	19%	
Precisión (al menos 5%)	5		5	5	10	10	5	41	19%	
Tiempo de Respuesta	5	5		5	5	5	5	31	14%	
Disponibilidad	5	5	5		5	10	5	36	16%	
% de Linealidad	0	0	5	5		5	5	21	10%	
Menor Costo	0	0	5	0	5		0	11	5%	
Trabaja con el Nivel de Ruido (70 dB)	5	5	5	5	5	10		36	17%	
								Total	217	100%

Ahora mostraremos la Tabla 7, una matriz comparativa que se utilizara para poder seleccionar el sensor más adecuado para la medición del espesor, para lo cual tenemos la siguiente ponderación:

10: Si es Excelente

5: Si es Muy Bueno

1: Si es Aceptable

Tabla 8.
Selección del Sensor de Distancia

Parámetros de Selección	Porcentaje de Importancia	Sensor Valor	Ultrasónico Total	Sensor Valor	Magnético Total	Sensor Valor	Láser Total
Rango de Detección (0 a 700 mm)	19%	10	1.9	5	0.95	10	1.9
Precisión (al menos 5%)	19%	10	1.9	10	1.9	10	1.9
Tiempo de Respuesta	14%	10	1.4	5	0.70	10	1.4
Disponibilidad	16%	10	1.6	5	0.80	1	0.16
% de Linealidad	10%	5	0.50	5	0.50	10	1
Menor Costo	5%	5	0.25	5	0.25	10	0.5
Trabaja con el Nivel de Ruido (70 dB)	17%	10	1.7	5	0.85	5	0.85
		Total	9.25	Total	5.95	Total	7.71

Por lo tanto, tenemos como resultado de la Tabla 8, qué para la medición del espesor en los listones de madera de balsa, seleccionamos al sensor ultrasónico, ya que cumple de mejor manera en precisión, tiempos de respuesta, rangos de detección y demás características, garantizando una buena adquisición de señal para este parámetro otro punto a favor que tiene este sensor es que fue el recomendado por un empleado de la empresa que ya trato de desarrollar el equipo industrial.



Figura 35. Sensor Ultrasónico
Fuente: (Fuchs, 2018)

Tabla 9.
Datos Técnicos

Rango Detección	50-8000 mm
Alimentación	15 a 30 VDC
Salida	4-20 mA
Precisión	1%

c) Selección de la Celda de Carga:

La celda de carga cumple la función de medición de peso, por lo que debe tener buena precisión y estabilidad (esta se garantiza con un módulo de pesaje) con resolución de salida de al menos 2 mv/V y un rango de temperatura de operación entre (7 y 30 °C). A pesar de existir una variedad de tipos de celdas de carga se optó por una de tipo Viga, ya que al tener un diseño cuadrado en la compensación de peso (Módulo de Pesaje) se acopla mejor para el tipo de viga ya que tiene una forma regular (prismática), garantizando que los datos obtenidos sean estables y correctos.

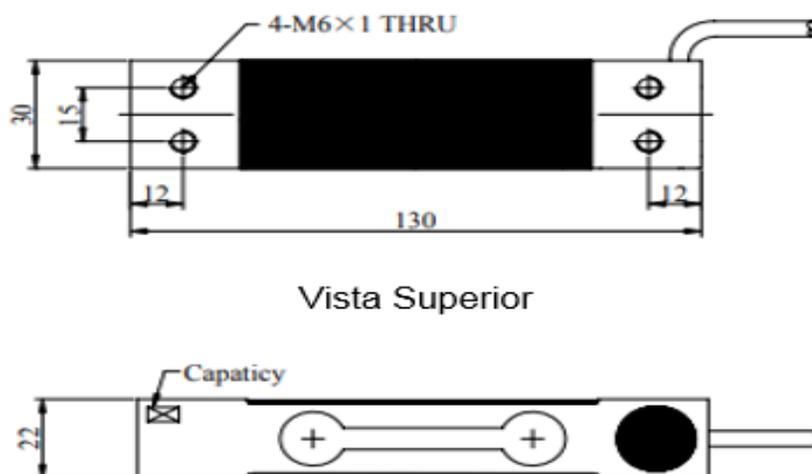


Figura 36. Celda de Carga Mavin NA1
Fuente: (Mavin, 2018)

Tabla 10.
Datos Técnicos

Rango de Peso	0-6000 gr
Alimentación	5 a 12 VDC
Salida	0 a 10 mV
Resolución	2 mV/V

d) Selección del transmisor de Peso:

Con una celda de carga y un compensador de peso Otro aspecto que debe garantizarse es la resistencia del equipo, ya que, si bien no estará sometido a una carga cíclica de esfuerzos mecánicos, podría llegar a recibir impactos ocasionales por parte de alguna herramienta, carga que debe soportar y que no debe influir en el funcionamiento de la máquina. Dicha resistencia se aseguró al momento de seleccionar el material. Para realizar este procedimiento de mejor manera nos apoyaremos con matrices de selección como las que se usó anteriormente.

Se realizará el mismo procedimiento de selección ver Tabla 11:

- 0: Si el parámetro no es de importancia en comparación a otro
- 5: Si los parámetros poseen un igual grado de importancia
- 10: Para el parámetro de mayor importancia sobre los demás

Al igual que en el sistema mecánico, se realizará una preselección de transmisores de pesos analizando costos, características y disponibilidad, reduciendo las opciones a tres, como lo son:

- Transmisor RS-485
- Transmisor DCR-4710
- Transmisor AWT20I

Tabla 11.
Porcentaje de Importancia de Parámetros para Transmisor de Peso

Parámetros	Rango de Amplificación (0 a 1000)	Precisión (al menos 5%)	Salida (4 a 20 mA)	Disponibilidad	% de Linealidad	Menor Costo	$\Sigma+1$	Porcentaje
Rango de Amplificación (0 a 1000)	5	10	5	10	10	41	26%	
Precisión (al menos 5%)	5	10	5	5	10	36	23%	
Salida (4 a 20 mA)	0	0	5	5	10	21	14%	
Disponibilidad	5	5	5	5	10	31	20%	
% de Linealidad	0	5	5	5	5	21	13%	
Menor Costo	0	0	0	0	5	6	4%	
Total							156	100%

Ahora mostraremos la Tabla 12, una matriz comparativa que se utilizara para poder seleccionar el sensor más adecuado para la medición del espesor, para lo cual tenemos la siguiente ponderación:

10: Si es Excelente

5: Si es Muy Bueno

1: Si es Aceptable

Tabla 12.
Selección del Transmisor de Peso

Parámetros de Selección	Porcentaje de Importancia	Transmisor Valor	RS485 Total	Transmisor Valor	DRC-4710 Total	Transmisor Valor	AWT20I Total
Rango de Amplificación (0 a 1000)	26%	10	2.6	10	2.6	10	2.6
Precisión (al menos 5%)	23%	10	2.3	10	2.3	5	1.15
Salida (4 a 20 mA)	14%	10	1.4	10	1.4	5	0.70
Disponibilidad	20%	1	0.20	10	2	5	1
% de Linealidad	13%	5	0.65	10	1.3	5	0.65
Menor Costo	4%	1	0.04	5	0.20	5	0.20
Total			7.19	Total	9.80	Total	6.3

Por lo tanto, tenemos como resultado de la Tabla 12, que para la transmisión de peso desde la celda de carga hacia el PLC, seleccionamos al Transmisor DRC-4710, ya que cumple de mejor manera en precisión, rangos de amplificación, disponibilidad y demás características, garantizando una buena comunicación de señal entre la celda de carga y la unidad de procesamiento.



Figura 37. Transmisor de Peso
Fuente: (Omega, 2018)

Tabla 13.
Datos Técnicos

Ganancia	333 a 1000
Alimentación	18 a 24 VDC
Salida	0 a 10 V
Linealidad en Rango de 0 a 10 V	±0.01 %

Armado: A pesar de tener una composición electrónica, tenemos una etapa de conformado mecánico ya que, el gabinete de control debe tener unas perforaciones donde irán las luces piloto, selector, pulsadores y el interfaz de comunicación HMI (TDE1 Logo).

3.3.3 Materiales:

- Gabinete de Control
- Terminales para el cable AWG
- Borneras 4 mm
- Puente Borneras 4 mm
- Portafusibles
- Canaletas/Real Din
- Selector dos Posiciones/Pulsadores
- Luces Piloto
- Conector a 120 V

3.4 Diseño del Subsistema de Control

3.4.1 Requerimientos:

El subsistema de Control se diseña para brindar la comunicación y procesamiento de la información adquirida por los sensores, se encarga también de la generación de reportes hacia el internet con los resultados finales obtenidos.

3.4.2 Diseño:

Con la finalidad de presentar una interfaz clara, intuitiva y siguiendo los requerimientos se establece un esquema del diseño a implementar. (Logreira, 2015)

- Interfaz HMI
- PLC

Para realizar este procedimiento de mejor manera nos apoyaremos con matrices de selección como las que se usó anteriormente.

Así que primero se procederá a determinar un porcentaje en función del nivel de importancia para cada parámetro que se evaluara, para después mediante una comparativa de estimación entre las características, seleccionar el material a continuación los valores con los que se iniciara este proceso, ver Tabla 14:

- 0: Si el parámetro no es de importancia en comparación a otro
- 5: Si los parámetros poseen un igual grado de importancia
- 10: Para el parámetro de mayor importancia sobre los demás

Tabla 14.
Porcentaje de Importancia de Parámetros para el PLC

Parámetros	Entradas Analógicas (Voltaje y Corriente)	Entradas y Salidas Digitales (Al menos 4 c/u)	Salida Analógicas (al menos 1)	Disponibilidad	Dificultad de Programación	Menor Costo	$\Sigma+1$	Porcentaje	
Entradas Analógicas		5	5	10	10	10	41	26%	
Entradas y Salidas Digitales (Al menos 4 c/u)	5		5	5	10	10	36	23%	
Salida Analógicas (al menos 1)	5	5		5	5	5	26	17%	
Disponibilidad	0	5	5		5	10	26	17%	
Dificultad de Programación	0	0	5	5		5	16	10%	
Menor Costo	0	0	5	0	5		11	7%	
							Total	156	100%

Ahora mostraremos la Tabla 15, una matriz comparativa que se utilizara para poder seleccionar el sensor más adecuado para la medición del espesor, para lo cual tenemos la siguiente ponderación:

10: Si es Excelente

5: Si es Muy Bueno

1: Si es Aceptable

Tabla 15.
Selección de la Unidad de Control Programable

Parámetros de Selección	Porcentaje de Importancia	PLC Valor	Logo Total	PLC Valor	Zelio Total	PLC Valor	Arduino Total
Entradas Analógicas (Voltaje y Corriente)	26%	10	2.6	10	2.6	10	2.6
Entradas y Salidas Digitales (Al menos 4 c/u)	23%	10	2.3	10	2.3	5	1.15
Salida Analógicas (al menos 1)	17%	10	1.7	10	1.7	5	0.85
Disponibilidad	17%	10	1.7	5	0.85	5	0.85
Dificultad de Programación	10%	5	0.5	1	0.1	1	0.1
Menor Costo	7%	10	0.7	10	0.7	10	0.7
		Total	9.5	Total	8.25	Total	6.25

Por lo tanto, tenemos como resultado de la Tabla 15, qué para la unidad de control y procesamiento de datos, se utilizará un PLC Logo, ya que cumple de mejor manera en poseer el número de entradas analógicas necesarias, disponibilidad bajo costo y demás características, garantizando una buena comunicación de señal entre la celda de carga y la unidad de procesamiento.

Como elegimos al PLC Logo el HMI que se usara es el TDE Logo, ya que es compatible con esta unidad de control, además de tener un precio económico y un entorno adecuado para las funciones que va a desarrollar. En la Figura 38 se lo puede apreciar:



Figura 38. HMI TDE Logo

Fuente: (Automation24, 2018)

A continuación, en la Tabla 16 se muestran las características más relevantes del HMI TDE Logo.

Tabla 16.
Características TDE Logo

Teclas de Funciones	4 (F1 al F4)
Alimentación	12/24 VDC
Puertos Ethernet	2
Temperatura de operación	0 a 50 °C

Para obtener la densidad con una precisión adecuada, se debe tener un sistema de control que brinde precisión y seguridad. Los parámetros que influyen son:

- Adquisición de las señales
- Procesamiento de la información
- Salida de datos al internet

a) Adquisición de Señales:

Las señales que se van a recoger por los sensores tendrán diferentes métodos de adquisición, para el caso del sensor ultrasónico tenemos una conexión directa con el módulo del PLC ya que su salida es de 4 a 20 mA, siendo 4 mA igual a 50 mm y 20 mA igual a 800 mm, con una respuesta casi lineal en el rango de 50 mm a 600 mm, no se necesita mayor compensación para tener una medida correcta por parte de este sensor. (Lledó, 2012)

Con la celda de carga se tiene un tratamiento diferente ya que su salida no puede conectarse directamente a las entradas del PLC, ya que es una variación de 0 a 10 mV, por lo que se usa de un transmisor de peso que amplifica y modula la salida de señal teniendo un rango de 0 a 10 V, sin embargo, la precisión está sujeta al número de divisiones que tiene el PLC para medir la señal, que para el PLC Logo es de 1024, es decir con la celda de carga de 6 Kg, tenemos pasos de 5.86 gr/V. (Adriana Vega, 2014)

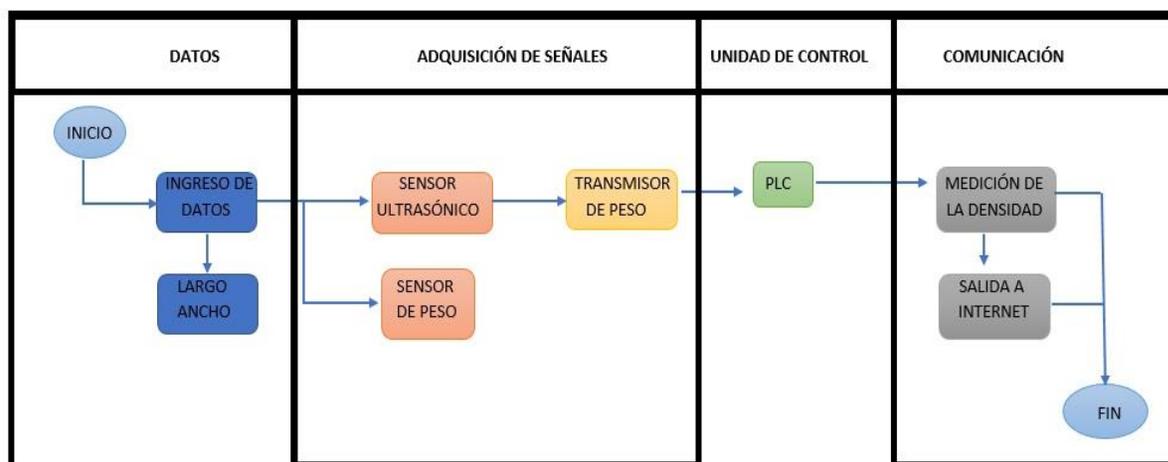


Figura 39. Esquema General del Procesamiento de la Información

b) Procesamiento de la Información:

Una vez definidas las entradas de información hacia la unidad de control PLC Logo, solo debemos tratarla mediante la programación del mismo, la información del sensor ultrasónico es leída directamente, pero la señal del transmisor de peso debe compensarse mediante un modelo matemático para mejorar el paso de 5,86 gr/V hasta un paso de 1,17 gr/V, con estos datos solo operamos internamente junto con los demás datos que se ingresaron para obtener la densidad de cada listón tanto en el sistema inglés (lb/pies³) como en el sistema internacional (kg/cm³), dichos valores presentaran un rango de precisión de 0 a 5% como máximo. (Piyare, 2013)

c) Salida de Datos al Internet

La necesidad de tener un respaldo de la información, es algo que todas las empresas buscan tener para poder realizar una retroalimentación, tanto de productos que salieron por concepto de ventas, así como también tener un registro de sobrantes en bodega, y la industria maderera en la que se implementó esta solución automatizada no es la excepción, por lo que luego de que los datos ingresados sean procesados y se tenga un resultado final, únicamente se debe enviar dicha información hacia el internet, para lograrlo eso establecemos la siguiente topología de red. Se mostrará la topología de red, que se implementó para él envío de datos de la densidad de la madera de balsa de datos hacia el internet.

Para lograr esta comunicación debemos establecer una configuración de dirección IP, para cada elemento que lo requiera, en este caso:

- HMI (TDE LOGO): IP 192.168.0.101
- PLC LOGO: IP 192.168.0.102
- ARDUINO SHIELD: IP 192.168.0.104
- SWITCH: IP 192.168.0.103

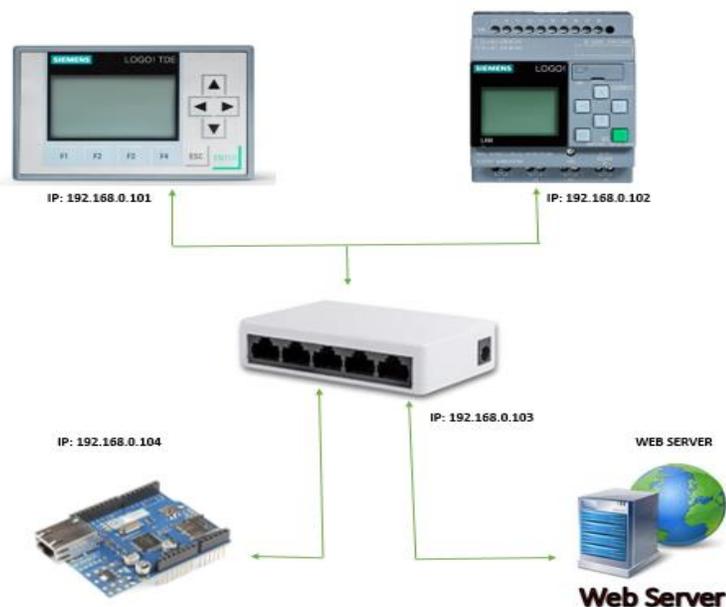


Figura 40. Topología de Red

La salida de la información hacia el internet se dará mediante un Arduino Ethernet Shield junto con un switch y un punto de red fijo, los datos de la densidad obtenidos de cada listón, se procesará mediante el PLC logo como ya se detalló en el punto anterior y se enviara hacia un Web Server, mediante la asignación de un IP al Arduino Ethernet Shield, este elemento tiene leds indicadores que nos muestra cuando existe emisión, recepción y colisión de datos, así como también la energización, velocidad (100 Mbps) y si la comunicación es dúplex. (SICK, 2018). Para él envió de datos se tiene una estructura de programación en el Arduino, donde se inicializa con la IP que tendrá el Web Server, pasando después al HTML de la página, como solo se necesita mostrar los datos de densidad desde el PLC Logo hasta el Arduino. (BricoGeek, 2018)

3.4.3 Materiales:

- Cables Ethernet
- Switch
- Arduino Ethernet Shield
- HMI TDE
- PLC Logo

3.5 Integración del Sistema

Definidos los subsistemas de cada etapa y sus diferentes funcionalidades se pasa a la integración del sistema donde apreciamos el funcionamiento en conjunto del equipo.

El cableado de cada uno de los sensores desde la estructura metálica de la maquina hacia el tablero de control deben tener las debidas protecciones y seguridades del caso, ya que debe garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Así mismo las piezas mecanizadas como la estructura, brazo soporte y módulo de pesaje deben trabajar de manera correcta con los sensores, brindado una robustez mecánica para que los datos que llegan hacia la unidad de control (PLC Logo), sean procesados de manera adecuada y se emitan hacia el internet con una precisión de hasta 5%.

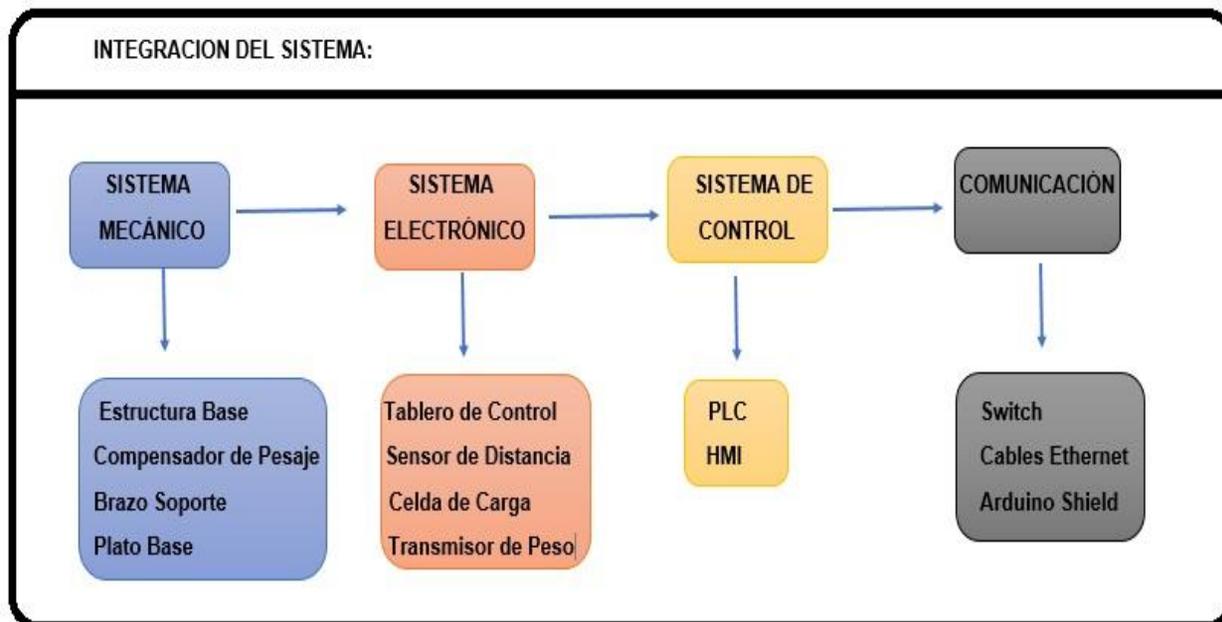


Figura 41. Integración del Sistema

3.6 Verificación del Sistema integrado

La manera de verificar el funcionamiento del equipo, será comparando los resultados con las mediciones realizadas por los operadores y con listones donde su densidad ya ha sido marcada.

Se tomará 100 muestras de cada lote ya marcada y se comparara con la densidad que muestre la máquina para cada uno de ellos, en total se evaluaran 4 lotes, teniendo 400 valores de densidad a evaluar.

3.7 Análisis del Modelo Matemático

Al seguir una ecuación matemática simple como lo es:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dónde: ρ es la densidad de cada listón de madera

m : es la masa de cada listón de madera

V : es el volumen de cada listón de madera

El modelamiento no tiene un análisis demasiado profundo, sin embargo, los datos dimensionales para el cálculo del volumen se ingresarán en mm, mientras que el dato de peso será en gramos, pero los resultados deben mostrarse en lb/pies³, por lo que internamente en la unidad de procesamiento se operará los factores de conversión para obtener dichas unidades.

3.8 Equipo Industrial para la Medición de la Densidad

Finalmente se tiene una maquina industrial para la medición de la densidad de listones de madera de balsa, que cumple con los requerimientos de precisión (errores de hasta 5%), robustez mecánica, que funciona en su ambiente de trabajo (polvo) sin ningún tipo de problema tanto en la adquisición y procesamiento de información, además de tener las debidas protecciones tanto a la entrada como a la salida de todo el sistema.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Implementación. – Luego de completar el desarrollo de los diferentes subsistemas que se tomó como guía con la metodología para sistemas mecatrónicos VDI 2206, procedemos a un análisis parcial y en conjunto del equipo industrial que se utilizara para la medición de la densidad de listones de madera de balsa.

4.1.1 Implementación Mecánica:

Luego del análisis desarrollado a lo largo del documento finalmente se mostrarán los subsistemas que se han ido exponiendo, en el caso del subsistema mecánico se tiene el módulo de pesaje y el brazo soporte, en las Figuras 42 y 43, se puede apreciar ambas partes por separado mientras que en la Figura 44 podemos observar la etapa mecánica ya en una sola pieza, es decir representado como conjunto, con los demás componentes que lo conforman.

En la Figura 42, se logra observar el módulo de pesaje que cumple con los requerimientos, establecidos al inicio del proyecto por la empresa, este módulo genera estabilidad mecánica para la adquisición de la señal de la celda de carga hacia el PLC, además de que no es afectada en su funcionamiento por el ambiente de trabajo (polvo y arcilla).

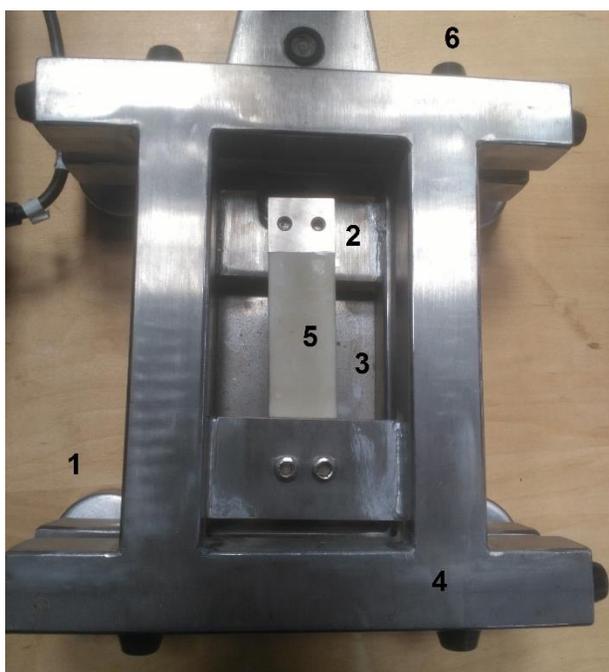


Figura 42. Módulo de Pesaje

En la Tabla 17 se puede apreciar los elementos del módulo de pesaje:

Tabla 17.
Módulo de Pesaje

N.º	Descripción
1	Base apoyo
2	Ajuste para la celda de carga
3	Base para la celda de carga
4	Estructura del módulo de pesaje
5	Celda de carga
6	Elastómeros

En la Figura 43 se puede apreciar el brazo-apoyo que se utilizara para la medición del sensor ultrasónico, brindando un nivel de paralelismo con respecto a la plataforma base. Cuyos elementos tienen las debidas protecciones que brinden las garantías para el proceso de medición.



Figura 43. Brazo Soporte

Se tiene la implementación del subsistema mecánico (Base-Estructura y Brazo-Apoyo) que se puede apreciar en la Figura 44, las características que se cumplen como conjunto es la robustez mecánica (soporte el peso del sensor, cubierta protectora y posibles impactos de los listones de madera de balsa) para la aplicación que fue diseñada, otro aspecto a recalcar es que tiene una buena adherencia con la mesa de trabajo debido a los cauchos antideslizantes que posee en los apoyos de la base, esta característica por otra parte además genera una estabilidad en toda la estructura del

equipo industrial para la medición en los listones de madera balsa desde la parte baja, hasta la parte superior donde se tiene al brazo-apoyo para que el sensor de distancia debidamente ajustado mediante un juego de tuerca y tornillo M5 (medidas establecidas en el diseño). Adicionalmente el ambiente de trabajo (polvo y arcilla) no afecta en ningún aspecto el desenvolvimiento del equipo para su correcto funcionamiento.



Figura 44. Subsistema Mecánico Integrado

4.1.2 Implementación Electrónica:

Para la implementación del subsistema eléctrico/electrónico se procedió a montar los elementos, primero los de protección como son los portafusibles con sus respectivos fusibles de 3 Amperios, cuyo cálculo se realizó anteriormente, también se tiene un selector de dos posiciones que sirve para energizar y apagar el equipo.

Además, se tiene los elementos por donde se ingresará la información de las dimensiones de largo y ancho por lote, como lo son los pulsadores:

- Pulsador 1: Dato correspondiente a las unidades de las dimensiones
- Pulsador 2: Dato correspondiente a las decenas de las dimensiones
- Pulsador 3: Dato correspondiente a las centenas de las dimensiones

Por otra parte, también se tiene las luces piloto que sirven como indicadores de ingreso de dato (luz amarilla), proceso de medición (verde) y alarma (rojo).

Finalmente, en la parte central del tablero tenemos el interfaz HMI, que cumple con el propósito de navegación del sistema, con las teclas de función F1, F2, F3 y F4, tenemos tres opciones que son:

- F1: Muestra la Densidad de cada listón de madera de balsa
- F2: Función Ingreso del largo de cada listón de madera de balsa
- F3: Función Ingreso del ancho de cada listón de madera de balsa
- F4: Muestra los datos del sensor ultrasónico (espesor) y el valor del peso que es adquirido por la celda de carga.

En la Figura 45, podemos apreciar cómo está conformado el tablero de control con sus diferentes partes antes ya mencionadas.



Figura 45. Tablero de Control

Cabe mencionar que a la interna del tablero se tiene una distribución que consta de la siguiente manera, en la etapa superior se tiene las líneas de alimentación, seguidos en la segunda línea tenemos la etapa de potencia, para que finalmente tener la etapa de control, cada una de estas etapas están conformadas por diversos elementos como.

4.1.2.1 Etapa de Potencia:

- Portafusibles
- Fusibles Cerámicos de 3 Amperios
- Breaker de 3 Amperios
- Borneras para conexión
- Fuente de Alimentación de 24 VDC
- Puente de Borneras

4.1.2.2 Etapa de Control:

- PLC Logo
- Módulo de entradas digitales
- Transmisor de Peso

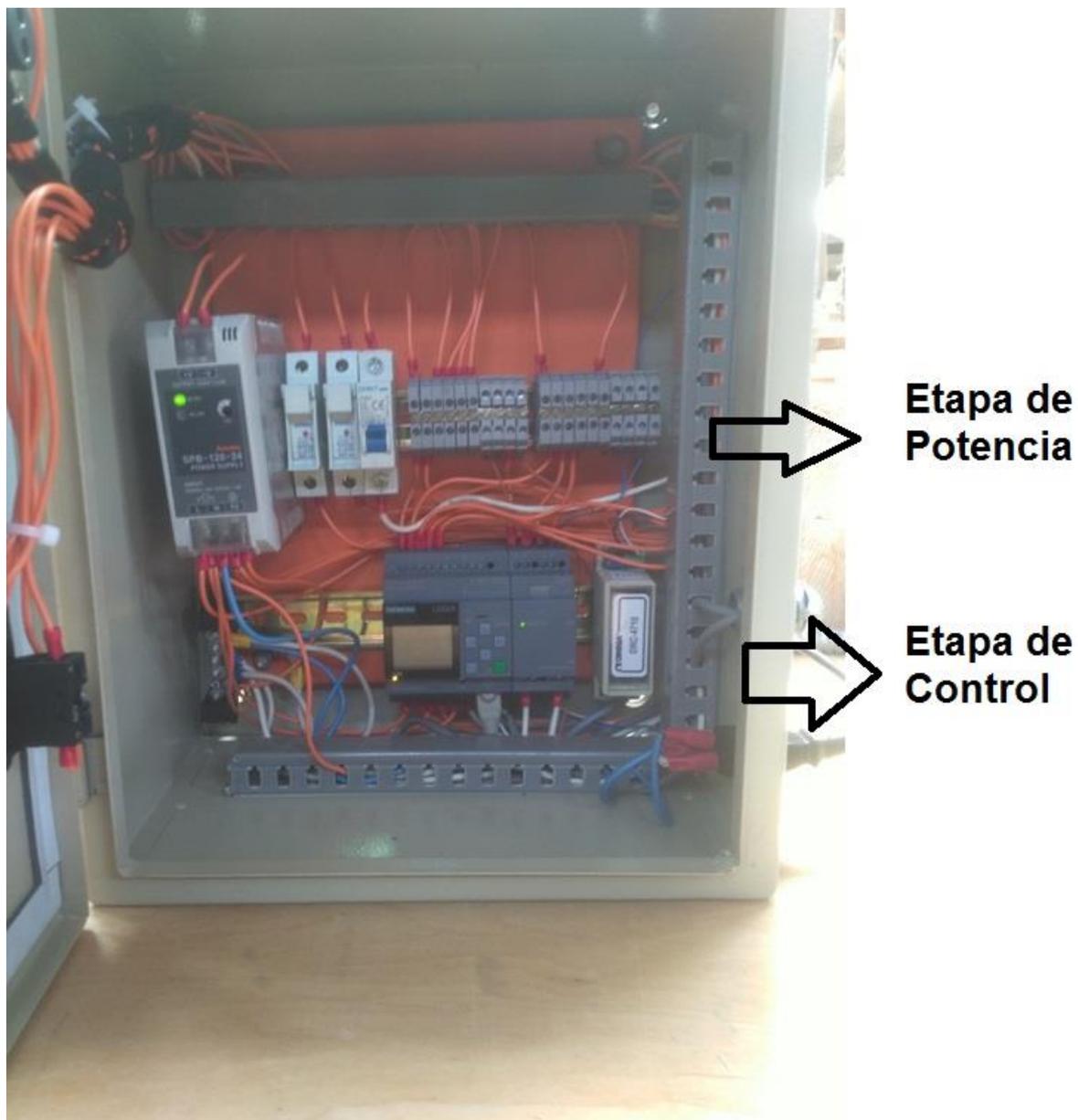


Figura 46. Tablero de Control Interno

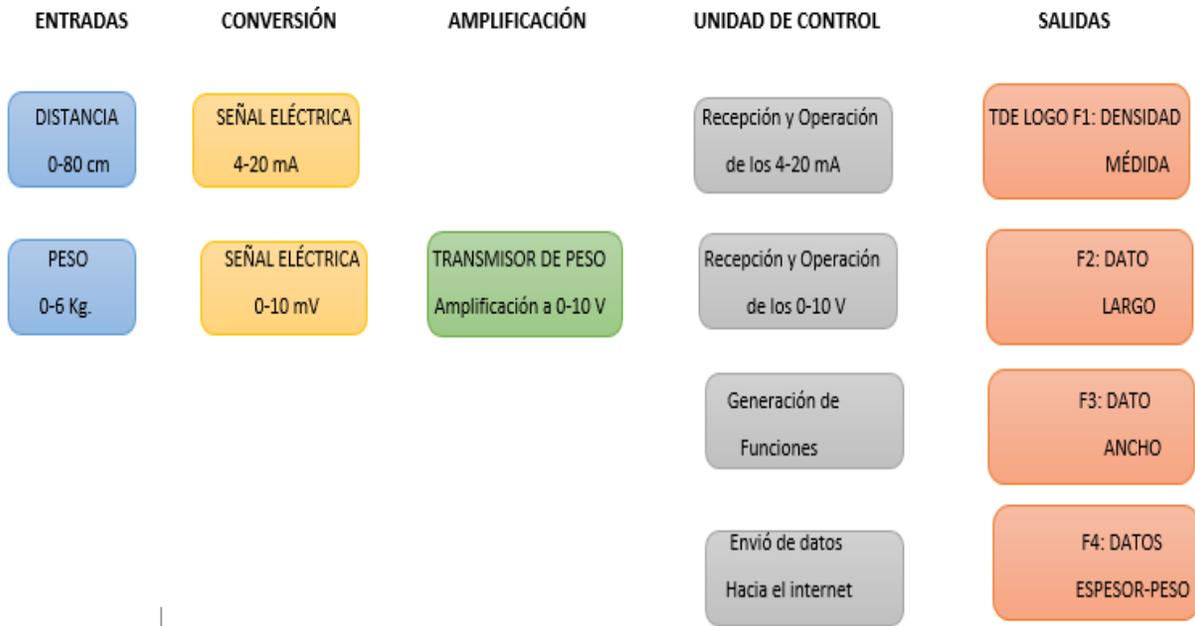


Figura 47. Sistema Electrónico integrado a la unidad de control

Finalmente, en la Figura 48 se tiene el equipo industrial para la medición de la densidad de listones de madera de balsa, ya implementando en conjunto y listo para su operación en la empresa maderera para el cual fue diseñado y en donde recolectara datos para poder comprobar el correcto funcionamiento del mismo.



Figura 48. Equipo Industrial para la Medición de la Densidad

4.2 Análisis de Resultados. – Una vez que el equipo ha sido implementado siguiendo todos los requerimientos que se solicitaron y las normas que también sirvieron de guía, procedemos a la etapa de pruebas, por lo que se tomara una muestra en base a las siguientes consideraciones:

Tiempo Promedio de Medición del Operario: 8 seg/listón.

En un minuto se tiene: 7 listones

En una hora se tiene: 420 listones

En 8 horas (Jornada Laboral). 3360 listones

Para el cálculo de la eficiencia tomamos el tiempo promedio por hora que se demoraban dos operadores al momento de realizar la medición y comparamos con las proyecciones que tuvimos teniendo como resultado:

Operador 1:

$$\eta = \frac{\textit{listones contados}}{\textit{listones proyectados}} \quad \textbf{Ecuación (34)}$$

$$\eta = \frac{318 \textit{ listones}}{420 \textit{ listones}}$$

$$\eta = 0.76$$

Operador 2:

$$\eta = \frac{\textit{listones contados}}{\textit{listones proyectados}}$$

$$\eta = \frac{305 \textit{ listones}}{420 \textit{ listones}}$$

$$\eta = 0.73$$

Teniendo como promedio una eficiencia de 0.75 por lo tanto, si utilizamos esta eficiencia con para tener un cálculo diario más real nos arroja un resultado de: 2520 listones por día. Un criterio para la selección de muestras que recomiendan algunos autores “*Dimension Research*”, (Contraloria, 2012) o “*Guía Práctica para la selección de muestras*” nos dice que al menos un 5% del total de la población debe considerarse en los ensayos para tener una confiabilidad del 95% mínimo. (Ruiz, 2013) Utilizando este criterio tenemos:

$$\text{Tamaño de la Muestra} = 0.05 * 2520 \text{ listones} \quad \text{Ecuación (35)}$$

$$\text{Tamaño de la Muestra} = 126 \text{ listones/día}$$

Otro criterio de selección de muestra que se establece en el artículo “El tamaño de la muestra” de Vicente Manzano nos dice que: (Research, 2018)

$$\text{Tamaño de la Muestra} = \left(\frac{Z * \sigma}{\text{error admisible}} \right)^2 \quad \text{Ecuación (36)}$$

Dónde: Z: nivel de confiabilidad (95%= 1.96)

σ =Desviación estándar (Obtenido durante los ensayos $\sigma=0.22$)

Reemplazando los datos tenemos:

$$\text{Tamaño de la Muestra} = \left(\frac{1.96 * 0.22}{0.05} \right)^2$$

$$\text{Tamaño de la Muestra} = 74 \text{ listones/día}$$

Por lo tanto, si se obtiene el promedio a partir de los dos criterios presentados el tamaño de la muestra que se tiene es:

$$\text{Tamaño de la Muestra} = \frac{\text{Criterio1} + \text{Criterio2}}{2} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$\text{Tamaño de la Muestra} = \frac{126 + 74}{2} \text{ listones/día}$$

$$\text{Tamaño de la Muestra} = 100 \text{ listones/día}$$

Partiendo de esto se tiene 100 listones de madera de balsa de 4 diferentes lotes, algunos ya estarán marcados con su densidad, mientras que en los demás se medirá a la par con un operador del área de censado para validar la precisión de la máquina. Adicionalmente se realizará una comparación de los datos que se muestran en la máquina vs los datos que se pueden apreciar en el Servidor Web, como un control de calidad que permita brindar una integridad en la información que se está procesando. (Manzano, 2013)

En la Figura 49 tenemos los datos de la densidad real vs la densidad obtenida por la máquina, de esta gráfica podemos concluir un factor de ajuste lineal cercano a 1 (0.9974), lo que demuestra que la precisión de la máquina es bastante aceptable.

Lote 1:

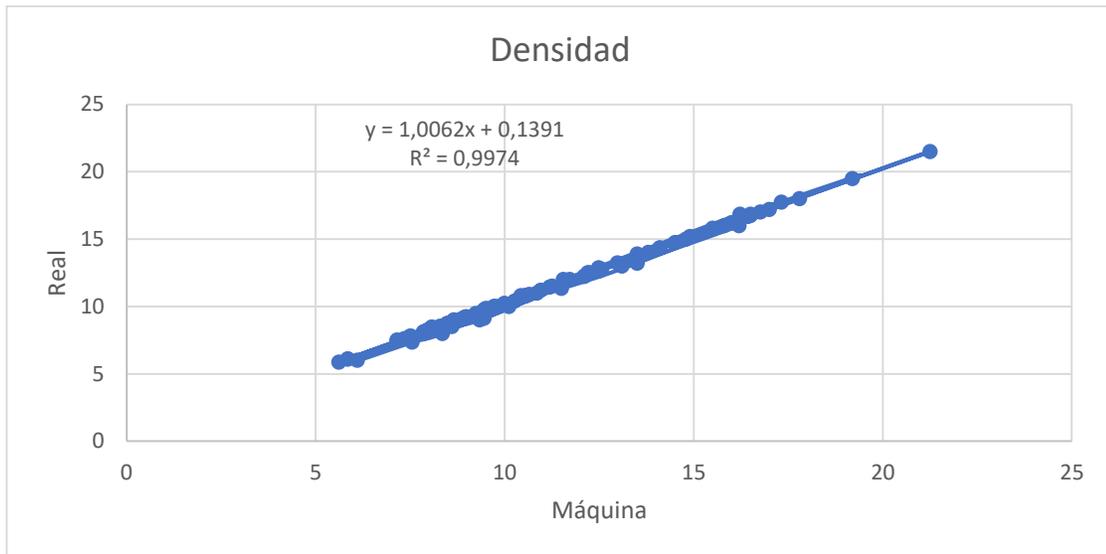


Figura 49. Grafica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa

A continuación, en la Figura 50 podemos observar las mediciones de la densidad a lo largo del tiempo.

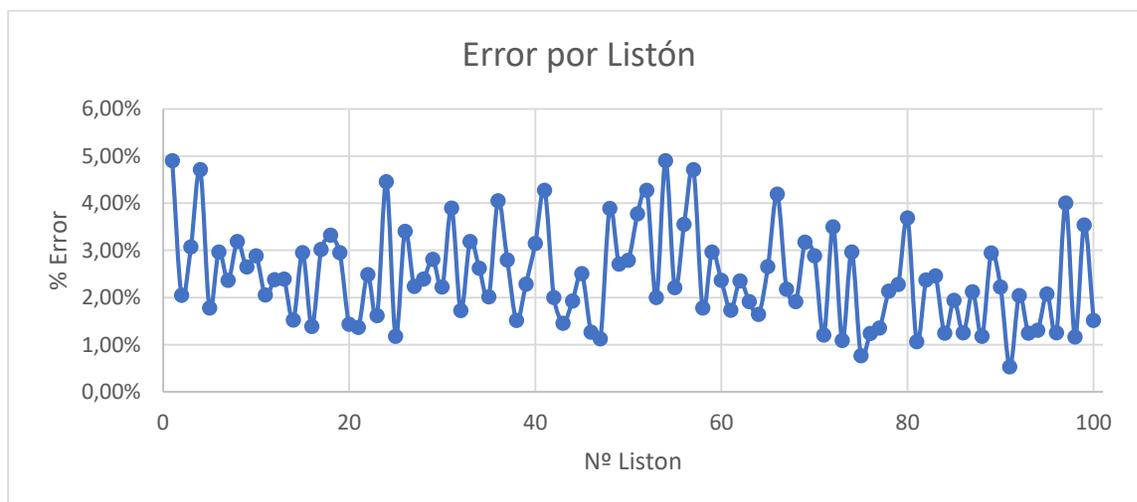


Figura 50. Gráfica del Error a lo largo de las Medidas en los Listones de Madera

Los valores de la densidad real (medida por los operadores) es muy similar a la densidad medida por el equipo industrial, en el cuadro de errores se puede observar que los valores no superan el 5% (tanto individualmente como en promedio final del lote), que se tiene planteado como indicador de precisión, en otra comparación significativa se puede apreciar que los tiempos de medición se mejoran notablemente (tiempo operador = 8 segundos en promedio, mientras que tiempo maquina = 2,5 segundos en promedio).

En la Figura 51 podemos apreciar que el ajuste lineal (factor=0.9941) que existe entre los datos que se obtiene del equipo industrial y los datos que llegan a mostrarse en el Servidor Web (Internet), es casi 1 demostrando que se tiene una comunicación correcta y que los datos mostrados tanto en el HMI de la Máquina como en el Internet son fiables.

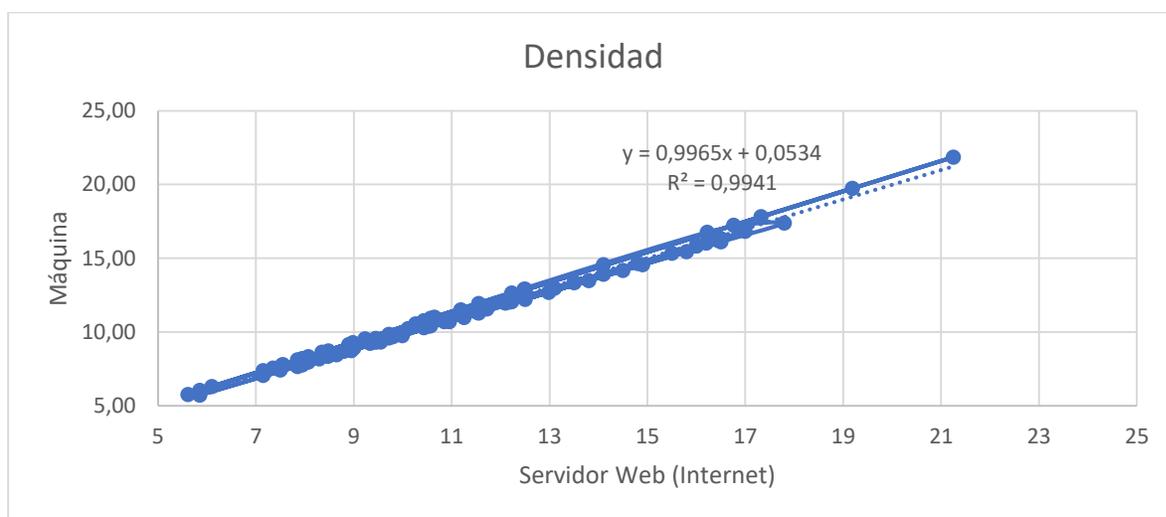


Figura 51. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet

Ahora realizaremos el mismo procedimiento para los otros 3 lotes, para el Lote 2 se tiene la Figura 52 un factor de ajuste lineal 0.9969.

Lote 2:

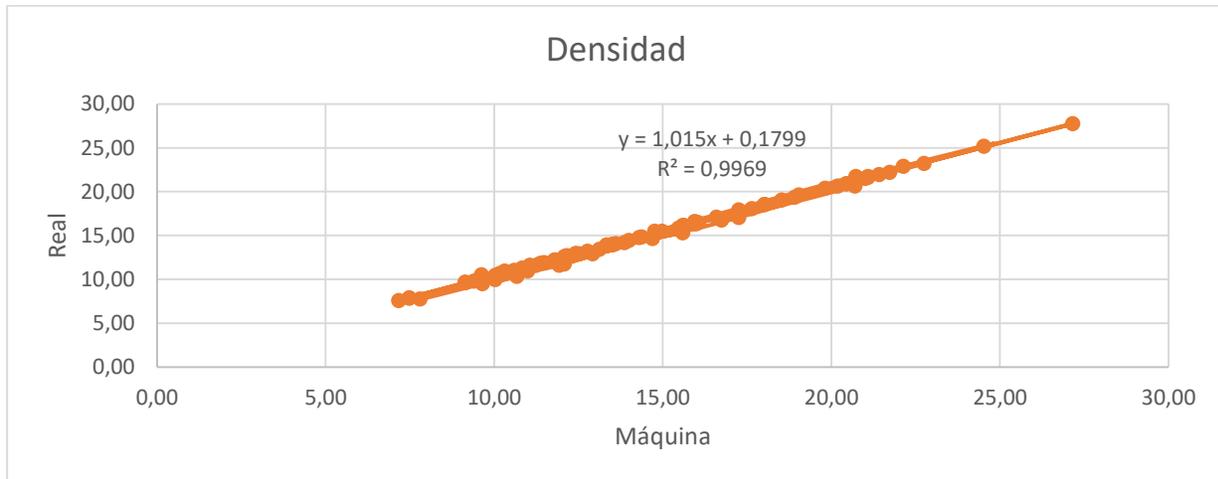


Figura 52. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa

La Figura 53 muestra las mediciones de la densidad a lo largo del tiempo para el Lote 2.

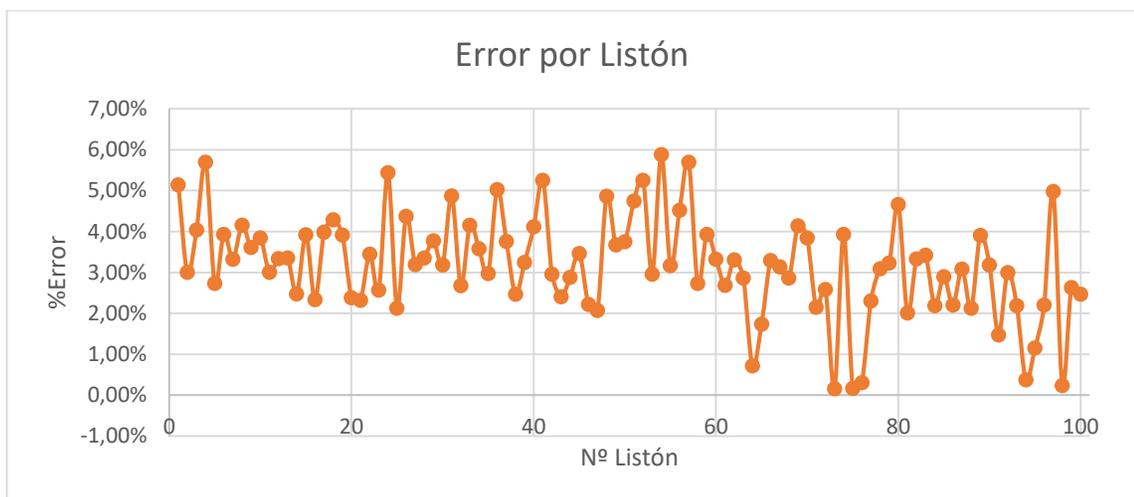


Figura 53. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa

Para este segundo lote se puede apreciar valores de la densidad real muy similar a la densidad medida por el equipo industrial, y en el cuadro de errores se puede observar que los valores no superan el 6%, los tiempos de medición se mejoran notablemente (tiempo operador = 7,5 segundos en promedio, mientras que tiempo maquina = 2,5 segundos en promedio).

En la Figura 54 podemos apreciar que el ajuste lineal (factor=0.9901) que existe entre los datos que se obtiene del equipo industrial y los datos que llegan a mostrarse en el Servidor Web (Internet), es casi 1 demostrando que se tiene una comunicación correcta y que los datos mostrados tanto en el HMI de la Máquina como en el Internet son fiables.

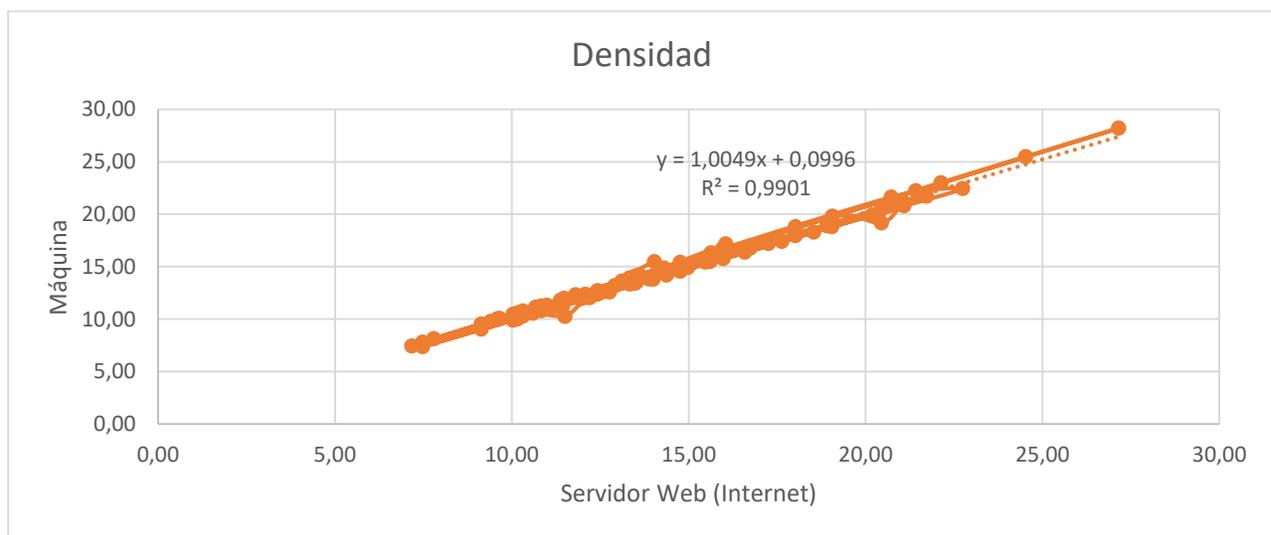


Figura 54. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet

Para el Lote 3 se tiene la Figura 55 un factor de ajuste lineal 0.9974.

Lote 3:

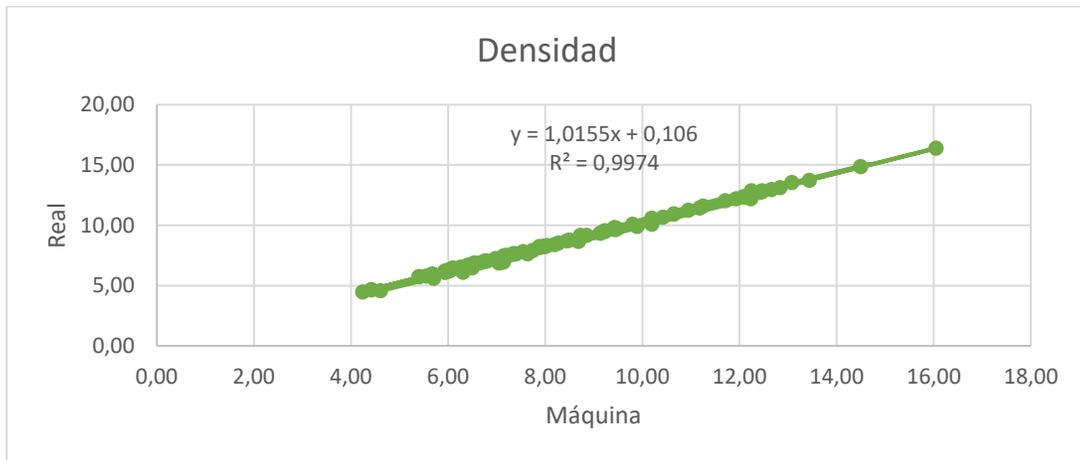


Figura 55. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa

La Figura 56 muestra las mediciones de la densidad a lo largo del tiempo para el Lote 3.

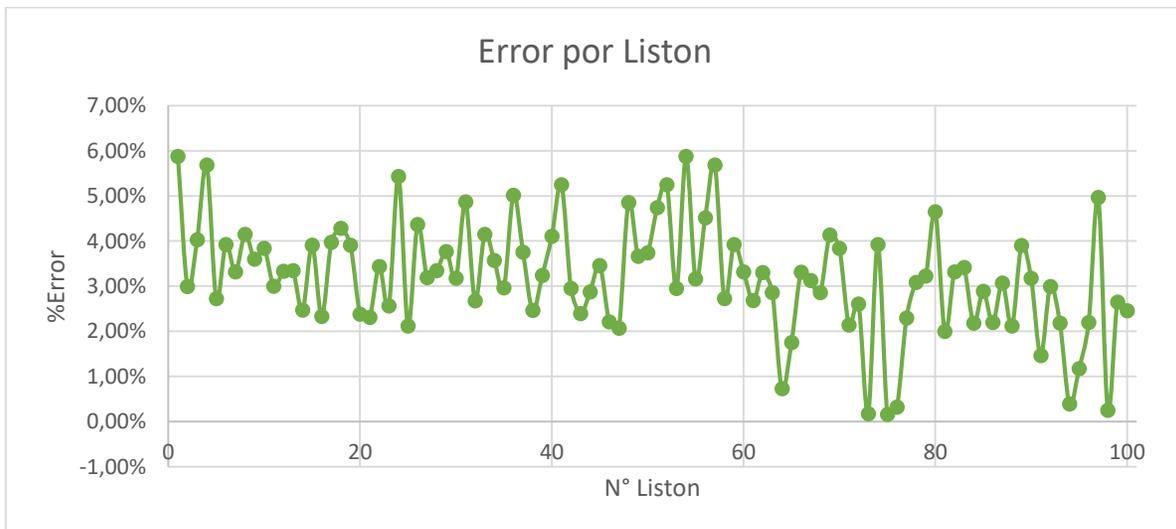


Figura 56. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa

Los valores que se obtienen entre las densidades real vs máquina es similar, en el cuadro de errores se puede observar que los valores no superan el 6%, que se tiene planteado como indicador de precisión, además se puede comparar también que los tiempos de medición se mejoran notablemente (tiempo operador = 8,5 segundos en promedio, mientras que tiempo maquina = 2,5 segundos en promedio).

En la Figura 57 podemos apreciar que el ajuste lineal (factor=0.9957) que existe entre los datos que se obtiene del equipo industrial y los datos que llegan a mostrarse en el Servidor Web (Internet), es casi 1 demostrando que se tiene una comunicación correcta y que los datos mostrados tanto en el HMI de la Máquina como en el Internet son fiables.

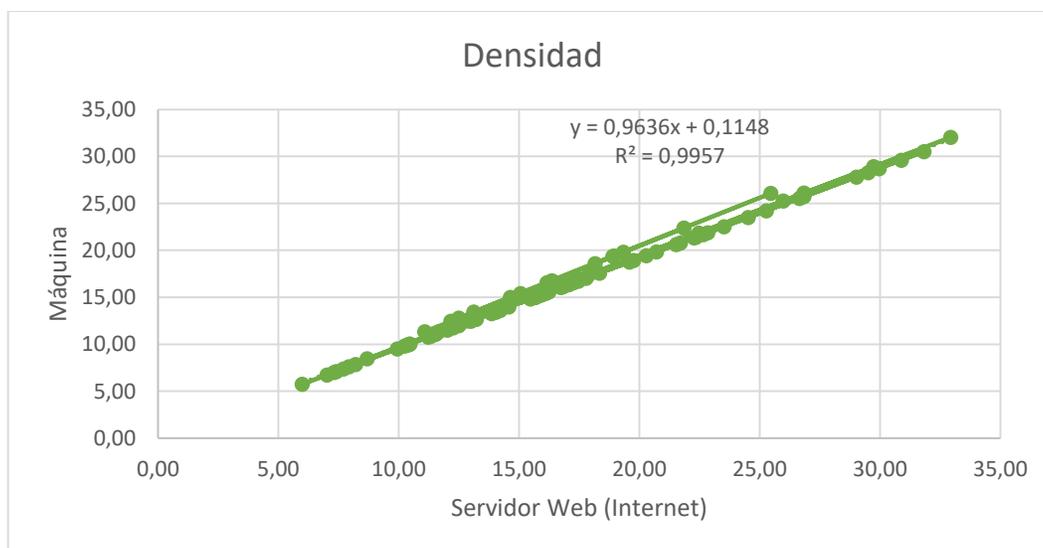


Figura 57. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet

En la Figura 58 tenemos los datos de la densidad real vs la densidad obtenida por la máquina, de esta gráfica podemos concluir un factor de correlación de cercano a 1 (0.9974), lo que demuestra que la precisión de la máquina es bastante aceptable.

Lote 4:

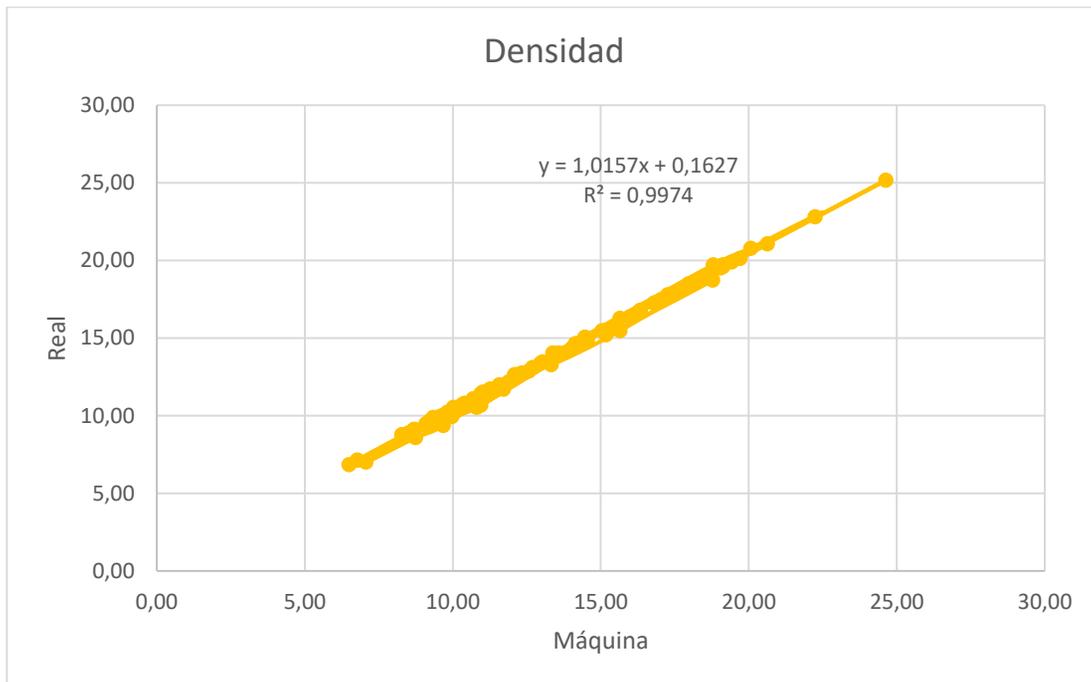


Figura 58. Gráfica de Densidad de los Listones de Madera de Balsa

A continuación, en la Figura 59 podemos observar las mediciones de la densidad a lo largo del tiempo. Ya que como se mencionó anteriormente la muestra por lote es de 100 listones de madera de balsa.

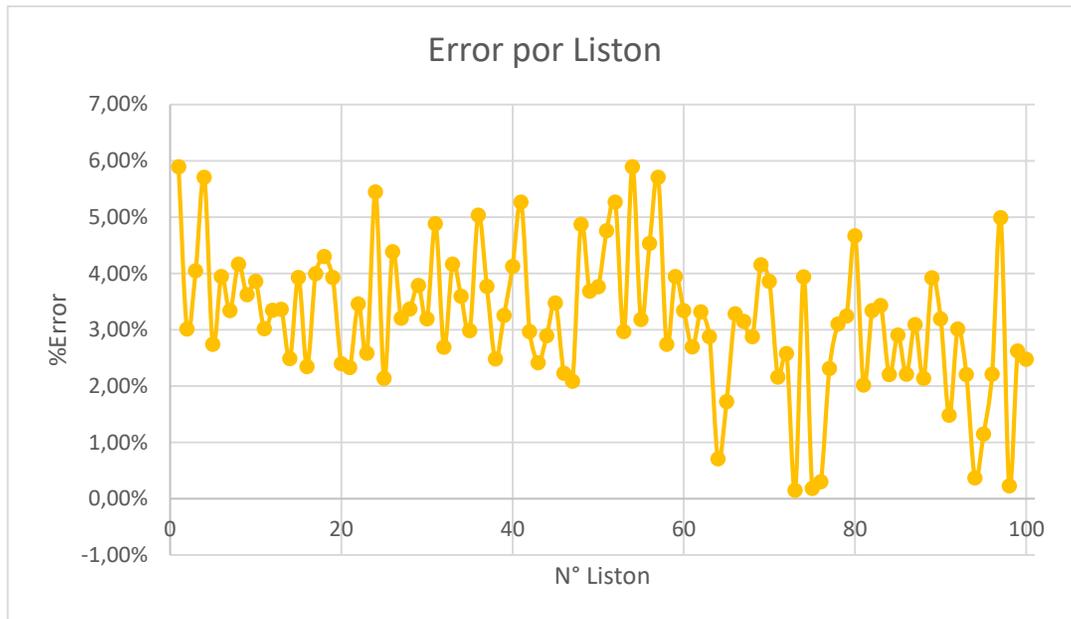


Figura 59. Error a lo largo de la medida de los Listones de Madera de Balsa

Finalmente en el último lote se puede observar que los valores de la densidad real (medida por los operadores) es muy similar a la densidad medida por el equipo industrial, y en el cuadro de errores se puede observar que los valores no superan el 5% (tanto individualmente como en promedio final del lote), que se tiene planteado como indicador de precisión, además se puede comparar también que los tiempos de medición se mejoran notablemente (tiempo operador = 7 segundos en promedio, mientras que tiempo maquina = 2,5 segundos en promedio). En promedio el error es menor al 5%, sin embargo, en listones de menor densidad (7 a 10 lb/ft³) se puede apreciar que los errores están en valores entre 3 y 5 %, mientras que en valores de rango medio (11 a 19lb/ft³) el error se encuentra en el rango de 1 y 2.5%.

En la Figura 60 podemos apreciar que el ajuste lineal (factor=0.9774) que existe entre los datos que se obtiene del equipo industrial y los datos que llegan a mostrarse en el Servidor Web (Internet), es casi 1 demostrando que se tiene una comunicación correcta y que los datos mostrados tanto en el HMI de la Máquina como en el Internet son fiables.

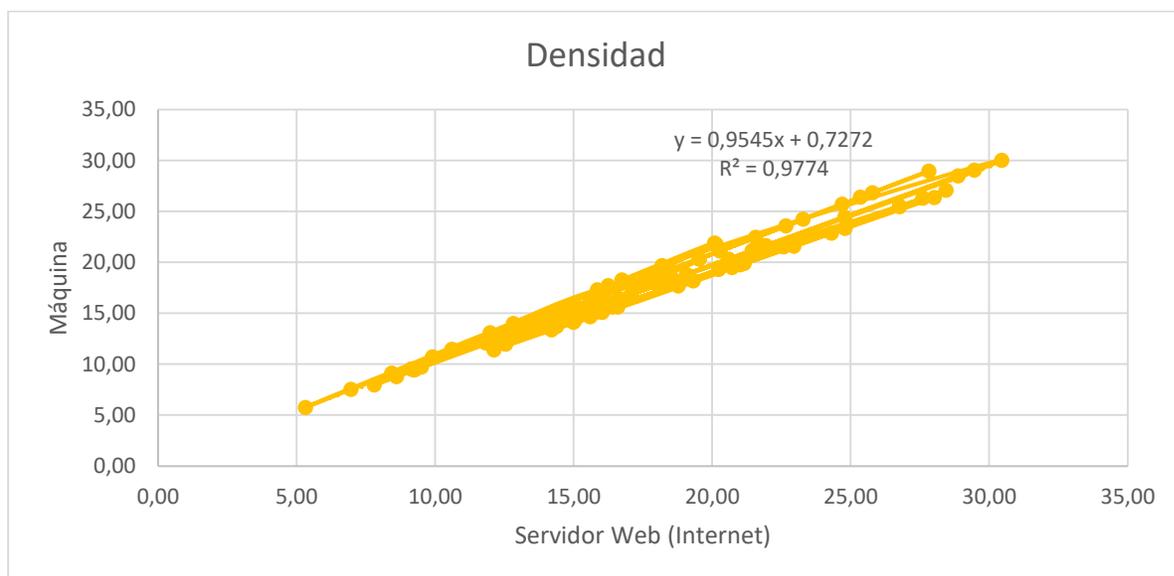


Figura 60. Gráfica de la Densidad de la Máquina vs Datos enviados a Internet

Luego de realizar los procedimientos de validación sobre la información que muestra el equipo industrial para la medición de la densidad de listones de madera de balsa y el Servidor Web, podemos apreciar que ambos datos tienen un ajuste lineal promedio de 0.9893 y que el error promedio que existe entre ambos datos es de 1.07%, mostrando una fiabilidad aceptable al momento de enviar la información de la máquina hacia el internet.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES:

Se diseñó, construyó e implementó un equipo industrial para la medición de la densidad de listones de madera de balsa, que cumple con los requerimientos de precisión (errores de hasta 5%), protecciones eléctricas (fusibles y breaker), una estructura mecánica que soporta su ambiente de trabajo (polvo y arcilla) y que brinde seguridad en las etapas donde opera en conjunto con los sensores (celda de carga y sensor ultrasónico) sin ningún tipo de afectación en el funcionamiento de la misma.

Con la metodología VDI 2206, se inició con los requerimientos a satisfacer, pasando por un diseño preliminar y la división de subprocesos (mecánicos, electrónicos y de control), en cada uno de estos se da un diseño específico donde se atendió a cada variable que se presentó garantizando así un equipo 100% funcional para cada etapa, posteriormente se integran para obtener como resultado final un equipo industrial que brinde la solución para la cual fue fabricado. Utilizado para la medición de la densidad portable, ya que la etapa donde se produce el censado y obtención de resultados no ocupa un área de trabajo mayor a 30x30 cm, mientras que el tablero de control tiene un volumen de 40x30x20 cm, lo que permite una fácil instalación en cualquier zona del taller y que pueda moverse de un punto a otro si se desea.

En el capítulo 4, subsección 4.2 se tiene el análisis de la información que se recopiló para la validación del correcto funcionamiento del equipo industrial para la medición de la densidad en listones de madera de balsa, obteniendo como datos más relevantes un error de 2.63%.

Una vez que se garantizó el proceso de medición para los listones de madera de balsa, se desarrolló la etapa del envío de esta información hacia el internet mediante una topología de red mostrada en la Figura 40, al tratarse de un primer prototipo donde solo se visualiza los datos procesados por la unidad de control, se tiene un Web Server bastante intuitivo, es decir de fácil entendimiento. En el ajuste lineal entre densidad máquina vs densidad del Servidor Web, se tiene un error promedio Final de 1.07% asegurando una buena fiabilidad en la transmisión de datos desde la maquina hacia el internet.

Este equipo fue planteado para una estación de trabajo fijo en la empresa, ya que al momento de instalarlo se empotro a la mesa de trabajo el tablero de control, ayudado de unos ángulos, tuercas y tornillos, sin embargo, debido a su tamaño medio puede ser portable hacia otra estación de trabajo, considerando que debe realizarle el mismo procedimiento de instalación en donde vaya a ser utilizado para garantizar un buen funcionamiento y la ergonomía del operador.

5.2 RECOMENDACIONES:

Al tratarse de un primer prototipo se puede tener algunas recomendaciones en caso de buscar una mejora a futuro, como primer aspecto a recalcar es el rango de operación, esta máquina se diseñó para que opere un rango de peso de 0 a 6 kg, ya que fue un requerimiento dado por la empresa, sin embargo en caso de querer tratar de ampliar dicho rango, se debe utilizar una celda de carga tipo barra marca MAVIN NA1, ya que el módulo de pesaje se estableció para la geometría de la celda antes mencionada, teniendo valores de 10 kg, 15 kg, 20 kg hasta llegar a los 45 kg.

Otro aspecto a considerarse en caso de buscar ampliar el rango de operación de la máquina, es que se necesita una unidad de procesamiento con mayor capacidad de procesamiento valga la redundancia, ya que el PLC Logo (Unidad Actual) posee un rango para procesar la información de hasta 2^{10} (1024) y si aumentaría el rango de peso, se tendría una compensación de entrada de mucho mayor, perdiendo un poco la precisión entre el sensor y el PLC, por lo que se recomienda una unidad de control (PLC), de por lo menos 2^{14} (16384), si desearía ampliar hasta el nivel máximo (45kg), pero si se desea ampliar a unos 20 o 25 kg, con una unidad de procesamiento de hasta 2^{12} (4096), sería más que suficiente para tener resultados muy parecidos a los que se obtuvo en el presente equipo.

Las dos recomendaciones anteriores hablan más que de un cambio, de una ampliación del rango de operación, sin embargo, también cabe mencionar que, si se desea un cambio significativo a nivel de peso, el módulo de pesaje debe sufrir algunas modificaciones, ya que al soportar una carga mayor la compensación mecánica también sufrirá un desgaste mayor que si no se toma en cuenta puede producir grandes errores en el cálculo de la densidad de los listones de madera de balsa. Pero este equipo puede utilizarse como guía de los resultados que se deben esperar tanto a nivel de precisión, como a tiempos de respuestas por parte del equipo.

Un aspecto a mejorarse sin duda y que tiene una flexibilidad más amplia es el manejo de envío de datos hacia el internet, que puede recibir cambios desde la interfaz de usuario hasta la forma de adquirir los datos, actualmente el criterio para evitar cálculos de cero en el reporte de datos, es un retardo de 2 segundos en la toma de datos, que es un sistema funcional, pero que podría mejorarse con un accionado mecánico (pulsador) que cada vez que sea oprimido tome el dato, teniendo un control más veraz sobre esta parte del sistema, aunque esta solución es más práctica representa un aumento de tiempo en la medición de los listones de madera de balsa, y para la presente empresa considero que era más importante mejorar el tiempo de censado sobre la generación de documentos.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Da silva, s. K.-i. (2007). *Structures and undefined "compressive response and failure of balsa wood"*. Elsevier.
- Aceros, n. Y. (2017). *Manual de diseño para la construcción con acero*. Mexico: norma astm.
- Adriana vega, f. S. (2014). *Internet de los objetos empleando arduino para la gestión eléctrica domiciliaria*. Escuela de administración y negocios.
- Alicante, a. (2014). *Mecanizados sinc*. Blog mecanizados sinc sl.
- Almeida, j. M. (2013). *Determinar el rendimiento y costos de industrialización primaria en madera de balsa (ochroma pyramidale)*. Ibarra: repositorio universidad técnica del norte.
- Almeida, m. M. (2017). *Caracterización dinámica de la madera de balsa del ecuador*. Sangolquí: repositorio universidad de las fuerzas armadas-espe.
- Automation24. (2018). *Hmi tde logo*. <https://www.automation24.biz/siemens-logo-8-tde-6ed1055-4mh00-0ba1>.
- Balsaflex. (2018). *Aplicaciones de la madera de balsa*. Quevedo: <http://www.balsaflex.com/en/>.
- Betty gonzález, x. C. (2010). *Caracterización del cultivo de balsa (ochroma pyramidale) en la provincia de los ríos - ecuador*. Quevedo.
- Bricogeek. (2018). *Sensores de distancia láser*. <https://tienda.bricogeek.com/sensores-distancia/997-sensor-de-distancia-laser-vl53l0x.html>.
- Cabot. (2018). *Cauchos reforzados*. Quito: catálogo de cauchos.
- Calvopiña, a. (2013). *Diseño, construcción y simulación de una maquina clasificadora de frutos*. Sangolquí: universidad de las fuerzas armadas-espe.
- Carbono, g. D. (2018). *Placa acero a36*. https://www.ehowenespanol.com/caracteristicas-del-acero-sae-a36-info_153282.
- Contraloría. (2012). *Guía para la construcción de muestras*. Santiago: unidad técnica de control externo.
- Chave, j. (2006). *Medición de densidad de madera en árboles tropicales manual de campo*. Toulouse.
- Chiriboga, c. M. (2013). *Tipo de corte en la madera verde de balsa*. Guayaquil: repositorio universidad católica de santiago de guayaquil.

- Christian narváez muñoz, n. V. (2018). *Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (ochroma pyramidale) ecuatoriana*. Sangolqui: repositorio universidad de las fuerzas armadas-espe.
- Díaz, f. (2007). *Tablas gráficas para el diseño de elementos de máquina*. Cuautitlán: facultad de estudios superiores cuautitlán.
- Fuchs, p. (2018). *Sensor ultrasónico ub800-18gm40-u-v1*. Alemania: catálogo sensores.
- Gamow, g. (2009). *Biografía de la física*. Alianza.
- Hetsch, s. (2004). *La comercialización de madera en la provincia de pastaza*. Friburgo.
- Ingelcom. (2014). *Tipos de cable awg*. Quito: catálogo de cables awg.
- Ingemecánica. (2019). *Tabla de dureza brinell*.
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html> .
- Logreira, p. (2015). *Controladores lógicos programables* . Tunja: facultad de ingeniería de la universidad pedagógica de colombia.
- Lledó, e. (2012). *Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma arduino*. Valencia: universidad politécnica de valencia.
- Manzano, v. (2013). *El tamaño de la muestra*.
- Martínez, a. (2014). *Cálculo de fusibles de una instalación eléctrica en baja tensión*. Construcciones arquitectónicas.
- Mavin. (2018). *Celda de carga mavin na1*. Quito: catálogo de celdas de carga.
- Meteqco. (2014). *Tabla de soldadura de materiales y maquinado de metales y aleaciones*. <https://meteqco.com/tipos-de-metales-de-soldar/> .
- Omega. (2018). *Transmisor de peso dcr-4710*. Estados unidos: cataólogo.
- Omron. (2018). *Sensores de distancia láser*. E3z laser photoelectric.
- Parra, p. (2015). *La balsa, la apuesta del sector maderero*. Quito.
- Piyare, r. (2013). *Internet of things: ubiquitous home control and monitoring system using android based smart phone* . Korea del sur: departament of information electronics engineering.
- Porto, j. P. (2014). *Soldadura*. Foro de ingeniería mecánica.
- Publicación. (2015). *Sensores industriales*. Lima: publicación universidad san martín de porres.

- Research, d. (2018). *Confident intervals for proportion calculator*. Blog dimension research.
- Ríos, j. M. (2011). *Comparación de propiedades físico-mecánicas de escapos florales de sotol con la madera de balsa*. Buenavista: repositorio universidad autónoma agraria antonio narro.
- Ruiz, j. (2013). *Implantación de arduino en las redes ethernet "arduino y el internet de las cosas"*. Blog josemanuelruizgutierrez.blogspot.com.
- Sac, e. E. (2018). *Cauchos y elementos antideslizantes*. Quito: catálogo de elastómeros.
- Salazar, j. (2012). *Física 3*. Nuevo león: iii semestre universidad autónoma de nuevo león.
- Sick. (2018). *Sensores de proximidad magnética*. <https://www.sick.com/es/es/sensores-de-proximidad/sensores-de-proximidad-magneticos/c/g201656>.
- Toledo, e. M. (2018). *Medidores de densidad*. Quito: catálogo de productos.
- Utilcell. (2017). *Tabla de valores par-apriete de tornillos comerciales hexagonales con coeficiente de fricción de 0.15 y roscas sin lubricación*. https://www.utilcell.es/wp-content/uploads/2017/05/13.-es_nt_tornilleria_utilcell.pdf.
- Vdi. (2004). *Vdi 2206*. Alemania: mdp 454.
- (2004). *Vdi 2206*. Alemania: mdp 454.
- Vikingo. (2018). *Planchas de cauchos antideslizantes*. Quito: catálogo de planchas cauchos.