



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

**DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE PALLETS DE MADERA
DE Balsa POSTERIOR AL PROCESO DE SECADO**

AUTOR: MIGUEL ANGEL VIVANCO MAZA

DIRECTOR: MSC. FERNANDO VINICIO VALENCIA AGUIRRE, ING

ASESOR: MSC. DAVID ALBERTO OJEDA PEÑA, ING

ASESOR: ING. BRIZEIDA NOHEMÍ GÁMEZ APARICIO, ING

IBARRA - ECUADOR

JULIO 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1150022885		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vivanco Maza Miguel Angel		
DIRECCIÓN:	Colón 7-63 entre Bolívar y Olmedo		
EMAIL:	mavivancom@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0989497582
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	“Dispositivo para determinar la densidad de pallets de madera de balsa posterior el proceso de secado”		
AUTOR:	Vivanco Maza Miguel Angel		
FECHA (DD/MM/AAAA):	05/07/2022		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	Pregrado		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica		
ASESOR/DIRECTOR:	Msc. Fernando Valencia, Ing.		

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 05 de julio del 2022.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miguel', is written over a horizontal red line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Nombre: Miguel Angel Vivanco Maza

Cédula: 1150022885

Certificación

En calidad de tutor del presente Trabajo de Grado titulado: “Dispositivo para determinar la densidad de pallets de madera de balsa posterior el proceso de secado”, certifico que fue desarrollado por el Sr. Miguel Angel Vivanco Maza, con cédula de identidad 1150022885, bajo mi supervisión.



Ing. Fernando Vinicio Valencia Aguirre Msc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mi madre DORIS CARMITA MAZA CALVA, quien con tanto esfuerzo me ha apoyado durante toda mi vida y en especial durante el transcurso de mis estudios, motivándome siempre a continuarlos y recordándome lo importante que es la preparación constante, no solo en el ámbito profesional sino también en el humano. Con su ejemplo lleno de solidaridad, dedicación y perseverancia, me ha sabido guiar por la vida para dar lo mejor de mí, manteniéndome siempre en el camino de la bondad y la verdad.

- Miguel Angel Vivanco Maza

Agradecimiento

Brindo mi más grato agradecimiento a mi padre y a mi madre, por haberme dado la vida y por otorgarme la herencia más valiosa que son los estudios.

Agradezco a la empresa INGENIOUS WORKS por brindar el auspicio para el desarrollo del presente trabajo, así como a los ingenieros Dany Orbes, Juan Pablo Guevara y Fernando Roldán, por haberme dado sus consejos y permitirme aprender de sus experiencias.

Al Ing. Fernando Valencia, quien me ha brindado apoyo y guía para que el presente trabajo se desarrolle con éxito. De igual manera, extendiendo mis agradecimientos a mis asesores Ing. David Ojeda e Ing. Brizeida Gámez, quienes con sus consejos me han permitido mejorar el presente trabajo. También a los catedráticos que, durante mis estudios universitarios, me han sabido brindar de su sabiduría, consejos y experiencia para poder prepararme como profesional. Así como a todos los docentes que a lo largo de mi vida académica han sabido guiarme por el buen camino.

A mis amigos, quienes me brindaron una mano, me acogieron y aconsejaron cuando más lo necesité. Especialmente al Ing. Christian Vásquez, quien con sus consejos ha sabido guiarme y ha sido un modelo a seguir, tanto a nivel personal como profesional.

A mis hermanas y hermano, con quienes a pesar de toda dificultad hemos mantenido una actitud de lucha y de apoyo mutuo.

A mis padrinos, quienes siempre me han brindado su apoyo y han llegado a ser un gran ejemplo de trabajo y dedicación. Así como demás familiares que en algún momento supieron brindarme un consejo que lo he guardado en el corazón y lo he tratado de aplicar en mi vida diaria.

A todos ellos, extendiendo mis más sinceros agradecimientos.

- Miguel Angel Vivanco Maza

Resumen

Debido a las condiciones climáticas que presenta Ecuador por su ubicación geográfica, la madera de balsa se ha caracterizado por ser de rápida producción y tener una fuerte demanda en los mercados internacionales gracias a su calidad y versatilidad de aplicaciones. Múltiples empresas han visto un nicho de mercado en la madera de balsa del cual obtener beneficios económicos, requiriendo justificar la calidad de su producto. La densidad de la madera de balsa, al ser un indicador de calidad, se obtiene en las empresas de forma manual empleando cinta métrica y una balanza, por lo que las empresas destinan recursos materiales y humanos para la ejecución de este trabajo, requiriendo de grandes cantidades de tiempo para cumplir con la producción. Ante esto, el presente proyecto propone desarrollar un dispositivo para el cálculo de la densidad en los listones o pallets de madera de balsa posterior al proceso de secado, el cual servirá para la obtención de esta propiedad física en un tiempo reducido, permitiendo acelerar el proceso de producción de la empresa. En la realización del dispositivo se determinaron los parámetros de diseño con base a los requerimientos del cliente. Se efectuó el diseño aplicando metodologías en el desarrollo de productos, se implementó el dispositivo y se validó su funcionamiento realizando pruebas con listones de madera de balsa proporcionados por la empresa auspiciante. Como resultado se obtuvo un dispositivo capaz de obtener la densidad de los listones de madera de balsa, reduciendo considerablemente el tiempo de producción.

Abstract

Ecuador presents different climatic conditions because of its geographical location, where balsa wood has been characterized for being of fast production and for having a huge demand in international markets because of its quality and applications. Multiple companies have seen a niche market in balsa wood to get economic benefits, requiring justifying the quality of their product. The balsa wood density is an indicator of quality, it is obtained manually using a tape measure and a scale, so companies need to allocate material and human resources to do this work, requiring large amounts of time to complete the production. This Project proposes to develop a device to calculate the density of balsa wood strips after the drying process, which will serve to get this physical property in a short time, accelerating the production process. The design parameters to develop the device were determined by the client's requirements and the design process was performed applying development of products methodologies. The device was implemented, and its functionality was validated by carrying out tests with balsa wood strips provided by the sponsoring company. As result, a device capable to get the density of balsa wood strips was obtained, where its function allowed to reduce the production time.

Índice de contenido

Autorización de uso y publicación a favor de la Universidad Técnica del Norte ...	2 -
Constancias.....	Error! Bookmark not defined.
Certificación	- 3 -
Dedicatoria	- 5 -
Agradecimiento.....	- 6 -
Resumen	- 7 -
Abstract	- 8 -
Índice de contenido.....	- 9 -
Índice de tablas	- 12 -
Índice de figuras.....	- 13 -
Introducción	- 15 -
El problema.....	- 15 -
Objetivos.....	- 16 -
Objetivo general	- 16 -
Objetivos específicos	- 17 -
Justificación	- 17 -
Alcance	- 18 -
Capítulo I Marco teórico.....	- 19 -
1.1 Generalidades de la madera de balsa.....	- 19 -
1.2 Metodologías en el diseño de productos.....	- 24 -
1.2.1 Quality Function Deployment - QFD.....	- 25 -
1.2.2 Design Thinking	- 27 -
1.2.3 Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)	- 30 -
1.3 Sistemas de medición	- 32 -

1.4 El diseño mecánico.....	- 35 -
1.4.1 El método de elementos finitos (Finite Element Method – FEM)	- 37 -
1.5 Sistemas embebidos.....	- 38 -
1.5.1 Microprocesadores.....	- 39 -
1.5.2 Microcontroladores.....	- 40 -
Capítulo II Metodología de diseño.....	- 42 -
2.1 Primera Etapa: Obtención de información	- 42 -
2.2 Segunda Etapa: Definición de problema y determinación de parámetros de diseño...-	42 -
2.3 Tercera Etapa: Diseño del dispositivo.....	- 43 -
2.3.1 Diseño de estructura	- 43 -
2.3.2 Diseño de acoples para dispositivos electrónicos.....	- 43 -
2.3.3 Diseño de esquemas de conexión	- 44 -
2.4 Cuarta Etapa: Implementación del dispositivo.....	- 44 -
2.4.1 Construcción de la estructura	- 44 -
2.4.2 Construcción de acoples y carcasas.....	- 45 -
2.4.3 Integración de elementos mecánicos y electrónicos.....	- 45 -
2.4.4 Desarrollo de algoritmos de control	- 45 -
2.5 Quinta etapa: Validación de funcionamiento	- 45 -
Capítulo III Resultados.....	- 46 -
3.1 Resultados Primera Etapa: Requerimientos y restricciones de diseño	- 46 -
3.1.1 Dimensiones	- 46 -
3.1.2 Condiciones de trabajo	- 46 -
3.2 Resultados Segunda Etapa: Definición de problema.....	- 50 -
3.3 Resultados Tercera Etapa: Diseño del dispositivo	- 52 -

3.3.1 Selección de material estructural	- 52 -
3.3.2 Selección de sensores de distancia	- 53 -
3.3.3 Selección de sensor de peso.....	- 56 -
3.3.4 Selección de sistemas embebidos	- 58 -
3.3.5 Selección de elemento de visualización	- 59 -
3.3.6 Diseño electrónico	- 61 -
3.3.7 Diseño de la estructura.	- 66 -
3.3.8 Acople para sensores de peso	- 79 -
3.3.9 Carcasa para sensor de ancho	- 80 -
3.3.10 Carcasa para sensor de alto.....	- 82 -
3.3.11 Carcasa para sensor de largo	- 82 -
3.3.12 Soporte flexible de anclaje a estructura.....	- 83 -
3.3.13 Carcasa para pantalla y sistemas embebidos	- 84 -
3.3.14 Diseño de pieza limitante	- 86 -
3.4 Resultados Cuarta Etapa: Implementación.....	- 87 -
3.4.1 Diseño de interfaz gráfica de usuario	- 89 -
3.4.2 Módulo de adquisición de datos	- 93 -
3.4.3 Costo de producción.....	- 94 -
3.5 Resultados Quinta etapa: Pruebas de funcionamiento.....	- 96 -
Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones.....	- 105 -
4.1 Conclusiones.....	- 105 -
4.2 Recomendaciones	- 106 -
BIBLIOGRAFÍA	- 107 -
ANEXOS.....	- 111 -

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Propiedades mecánicas de la balsa ecuatoriana por clase de densidad</i>	- 21 -
Tabla 2. <i>Balsa de Papua Nueva Guinea por clase de densidad</i>	- 22 -
Tabla 3. <i>Rango de medidas de madera de balsa en presentación de listones</i>	- 46 -
Tabla 4. <i>Nivel de importancia de los requerimientos del cliente</i>	- 48 -
Tabla 5. <i>Pesos de cada parámetro de diseño</i>	- 50 -
Tabla 6. <i>Selección del material estructural</i>	- 52 -
Tabla 7. <i>Sensores de distancia</i>	- 53 -
Tabla 8. <i>Función de los pines sensor TOF10120</i>	- 56 -
Tabla 9. <i>Comparación sistemas embebidos</i>	- 59 -
Tabla 10. <i>Comparación entre pantallas</i>	- 60 -
Tabla 11. <i>Elementos electrónicos seleccionados</i>	- 61 -
Tabla 12. <i>Resultados para combinaciones de carga</i>	- 78 -
Tabla 13. <i>Costos de producción</i>	- 95 -
Tabla 14. <i>Lecturas para listón 1</i>	- 98 -
Tabla 15. <i>Lecturas para listón 2</i>	- 99 -
Tabla 16. <i>Lecturas para listón 3</i>	- 99 -
Tabla 17. <i>Lecturas para listón 4</i>	- 100 -
Tabla 18. <i>Promedio de lecturas en cada listón</i>	- 101 -
Tabla 19. <i>Dimensiones reales de listones</i>	- 101 -
Tabla 20. <i>Error porcentual</i>	- 102 -
Tabla 21. <i>Error promedio por parámetro</i>	- 102 -
Tabla 22. <i>Densidades de pallets de madera de balsa</i>	- 103 -
Tabla 23. <i>Error porcentual de densidades</i>	- 103 -

Índice de figuras

Figura 1. <i>Matriz de la calidad de un envase para un producto farmacéutico</i>	- 27 -
Figura 2. <i>Design thinking: a non-linear process</i>	- 29 -
Figura 3. <i>Sistema de medición y elementos que lo forman</i>	- 34 -
Figura 4. <i>Casa de la calidad con base a los requerimientos del cliente</i>	- 49 -
Figura 5. <i>Sensor HC-SR04</i>	- 54 -
Figura 6. <i>Sensor TOF10120</i>	- 55 -
Figura 7. <i>Pines sensor TOF10120</i>	- 55 -
Figura 8. <i>Módulo HX711</i>	- 57 -
Figura 9. <i>Celda de carga</i>	- 57 -
Figura 10. <i>Conexión celda de carga y HX711</i>	- 58 -
Figura 11. <i>Esquemático módulo de adquisición de datos</i>	- 63 -
Figura 12. <i>Esquemático Raspberry pi 3 y Display</i>	- 64 -
Figura 13. <i>Trabajo y altura de superficie</i>	- 67 -
Figura 14. <i>Diseño estructural propuesto</i>	- 68 -
Figura 15. <i>Esfuerzos en la estructura a condiciones normales de carga</i>	- 69 -
Figura 16. <i>Factor de seguridad a condiciones normales de carga</i>	- 70 -
Figura 17. <i>Elemento estructural más afectado</i>	- 71 -
Figura 18. <i>Modelo virtual para análisis de carga</i>	- 71 -
Figura 19. <i>Esfuerzos en estructura</i>	- 72 -
Figura 20. <i>Diagrama de fuerza cortante</i>	- 73 -
Figura 21. <i>Diagrama de momento flector</i>	- 73 -
Figura 22. <i>Factor de seguridad de la estructura</i>	- 74 -
Figura 23. <i>Diagrama alterno de fuerza cortante</i>	- 75 -

Figura 24. <i>Fuerza cortante máxima</i>	- 75 -
Figura 25. <i>Diagrama alterno de momento flector</i>	- 76 -
Figura 26. <i>Momento flector máximo</i>	- 77 -
Figura 27. <i>Estructura con cubiertas</i>	- 79 -
Figura 28. <i>Plataforma de pesado</i>	- 80 -
Figura 29. <i>Acople sensor de ancho</i>	- 81 -
Figura 30. <i>Ensamble sensor ancho</i>	- 81 -
Figura 31. <i>Acople sensor alto</i>	- 82 -
Figura 32. <i>Acople sensor largo</i>	- 83 -
Figura 33. <i>Soporte flexible</i>	- 84 -
Figura 34. <i>Acople para pantalla</i>	- 85 -
Figura 35. <i>Carcasa para pantalla y placas</i>	- 85 -
Figura 36. <i>Ensamble de carcasa para placas y pantalla</i>	- 86 -
Figura 37. <i>Pieza limitante</i>	- 87 -
Figura 38. <i>Modelo 3D de dispositivo ensamblado</i>	- 88 -
Figura 39. <i>Dispositivo implementado</i>	- 89 -
Figura 40. <i>Pantalla error de conexión</i>	- 90 -
Figura 41. <i>Pantalla estado conectado</i>	- 91 -
Figura 42. <i>Pantalla lectura de datos</i>	- 92 -
Figura 43. <i>Diagrama de flujo módulo de adquisición de datos</i>	- 93 -
Figura 44. <i>Listones de madera de balsa</i>	- 96 -
Figura 45. <i>Medición de un listón de madera de balsa</i>	- 97 -
Figura 46. <i>Resultado del sistema de medición</i>	- 97 -
Figura 47. <i>Sensor de distancia láser industrial</i>	- 104 -

Introducción

El problema

Ecuador es uno de los principales proveedores de madera de balsa a nivel mundial debido a las condiciones climáticas que presenta por su ubicación geográfica y que permiten una rápida producción de este material. La calidad de madera de balsa que se da en el país es fuertemente demandada por mercados internacionales, presentándose como principales destinos de exportación países como China, Estados Unidos, Brasil, India y Dinamarca (Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones, 2019). Este producto tiene diversas aplicaciones debido a su alta resistencia y peso ligero, especialmente dentro de la industria donde es usado como material núcleo para las aspas de aerogeneradores, embarcaciones, aerodelismo, maquetería y como aislante acústico, eléctrico y térmico (Merchán & León, 2017). De acuerdo con notas periodísticas, los ingresos por motivo de exportaciones de la industria forestal, en el año 2020, se vieron incrementados en un 67% en comparación con el año 2019. Este incremento en la demanda del material es producto de los proyectos de energía renovable que China ha impulsado desde mediados del 2019. De todas las exportaciones de la industria forestal en el 2020, el 66.6% correspondió a la balsa y sus productos derivados, los cuales tienen por objetivo su aplicación en las aspas de los aerogeneradores para la producción de energía eólica en el país asiático (El Universo, 2021).

Con base a investigaciones realizadas en algunas universidades del Ecuador, existe una relación lineal que es directamente proporcional entre el módulo de elasticidad longitudinal (MOE), módulo de ruptura (MOR), resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra, con respecto a la densidad que presenta la madera de balsa. Por otro lado, la resistencia a la cizalla

presenta un patrón similar, diferenciándose en que su comportamiento es no lineal (Moncayo et al., 2018).

Debido a las diversas aplicaciones que presenta la madera de balsa es necesario conocer sus propiedades mecánicas (Ortiz P, 2018), relacionadas con su densidad, por lo que conocer esta última es de gran importancia para la exportación. Actualmente, el proceso de cálculo de densidad de la madera de balsa se realiza manualmente, requiriendo de inversiones de tiempo y de recursos considerables que repercuten directamente en los costos operativos, provocando que la empresa obtenga un menor margen de utilidad. Además, al ser un trabajo repetitivo, con grandes cantidades del producto a medir, puede haber mayor probabilidad de que haya errores humanos, provocando que disminuya la exactitud en las medidas y esto a su vez se vea reflejado en los valores de densidad obtenidos.

De esta manera, se plantea el desarrollo de un dispositivo para el cálculo de densidad en los pallets (listones) de madera de balsa posterior al proceso de secado con el objetivo de reducir el tiempo de ejecución de este trabajo, así como del uso de diferentes recursos operativos y, por consiguiente, incrementar la capacidad de monitoreo de la empresa.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un dispositivo para determinar la densidad de los pallets de madera de balsa posterior al proceso de secado.

Objetivos específicos

- Determinar los principales parámetros para desarrollar el dispositivo
- Diseñar el dispositivo para cumplir con los parámetros especificados
- Implementar el dispositivo
- Validar el funcionamiento del sistema de medición

Justificación

La madera de balsa del Ecuador es un producto altamente demandado en el mercado internacional. Su producción se da en diversas regiones del país donde hay una gran variedad de climas, junto con factores como la edad, lo que a su vez se ve reflejado en la densidad que presenta el material (PINARGOTE, 2019) y por lo tanto en su calidad, debido a que las propiedades mecánicas de la madera de balsa están en estrecha relación con esta propiedad física.

La densidad, al ser un indicador de calidad de la madera de balsa, es un valor que se requiere conocer para realizar el proceso de exportación, por lo que actualmente su cálculo se realiza de forma manual donde un operario, con ayuda de una cinta métrica, mide las dimensiones del producto y, con una báscula, toma la masa para luego calcular la densidad y llevar un registro escrito de estas propiedades físicas para cada pallet de este material.

Con base a esto, se ha planteado un proyecto para diseñar y fabricar un dispositivo que permita medir las propiedades físicas del producto de interés con el objetivo de disminuir el tiempo de ejecución de esta actividad y, de esta manera, optimizar los recursos que la empresa invierte para este proceso, lo cual posibilita la obtención de mejores resultados puesto que el margen de

error se mantendría en un rango aceptable y, en el aspecto económico, la empresa puede disminuir los costos operativos e incrementar la capacidad de medición para aumentar su producción

Alcance

El presente trabajo de titulación tiene la finalidad de diseñar y construir un dispositivo para determinar la densidad volumétrica de los pallets o listones de madera de balsa, posterior al proceso de secado; para lo cual se implementan diferentes fases para su desarrollo, mismas que involucran diseño del dispositivo, construcción y validación mediante pruebas de funcionamiento. Los requerimientos y restricciones necesarios de diseño estarán dados por la empresa **Ingenious Works** (empresa auspiciante) de la ciudad de Ibarra, en colaboración con la empresa **Mueblería Robert Garzón** de la ciudad de Ambato, mismas que han presentado la necesidad de contar con este dispositivo y, por lo tanto, brindan el auspicio para el desarrollo del presente proyecto

Capítulo I

Marco teórico

En este capítulo se establecen los conceptos generales sobre la madera de balsa, las metodologías en el diseño de productos, los sistemas de medición, el diseño mecánico y los sistemas embebidos. Fundamento teórico que sirve de base para el desarrollo del presente proyecto.

1.1 Generalidades de la madera de balsa

Ecuador ha sido el principal productor de *Ochroma Pyramidale*, conocida como balsa, a nivel mundial por más de 60 años debido a que la balsa ecuatoriana presenta propiedades superiores a la proveniente de otros países. Las condiciones geográficas que posee el país Andino hacen que la producción de la balsa tenga un óptimo desarrollo, de tal forma que sea un producto competitivo y de calidad. En el mercado actual existen alrededor de 11679 empresas dedicadas a la producción de balsa en diversas formas o presentaciones como madera aserrada, aglomerados, bloques encolados, paneles rígidos, paneles flexibles, láminas, palitos, tableros contrachapados, puertas y muebles y otros artículos derivados (Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones, 2019; Vera Peñafiel, 2018). Para junio del 2020, de acuerdo con el diario El Universo y Datos de la Asociación Ecuatoriana de Industriales de la Madera (AIMA), las exportaciones de balsa superaban los 225,78 millones de dólares que representan una participación aproximada del 0,36% del PIB (El Universo, 2020).

Una de las principales características de la madera de balsa es su acelerado crecimiento y la relativa baja densidad que presenta, convirtiéndola en una de las variedades de madera más ligeras disponibles. Esta especie alcanza una altura entre 25 y 35 m con diámetros que van desde los 30

hasta los 90 cm. Se cultiva de forma natural y por reforestación, el crecimiento de este árbol toma entre 4 y 6 años, siendo uno de los más rápidos en el mundo en crecer, permitiendo que su plantación posea cualidades ecológicas que evitan el deterioro y erosión del suelo (Aristega & Castro, 2017; Hernández Marcillo & Petroche García, 2017; Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones, 2019).

En un principio, la madera de balsa fue demandada por el sector militar estadounidense como sustituto del corcho durante la Primera Guerra Mundial y con el tiempo demostró gran fortaleza como material de construcción ligero para planeadores y contenedores de embarque. Debido a sus cualidades es empleada en diferentes industrias de construcción, químicas, aeromodelismo, arquitectura, cine y como componente de relleno para las aspas de aerogeneradores. Además, puede ser utilizada como aislante acústico, térmico y vibratorio, para transporte, embalaje o acondicionamiento de cargas (Aristega & Castro, 2017; Hernández Marcillo & Petroche García, 2017).

En comparación con otras maderas tropicales, la de balsa llega a presentar un peso muy liviano debido a su densidad, propiedad que llega a estar entre 40 y 380 kg/m³. Existen tres clases donde se clasifica la densidad de madera de balsa a nivel internacional ($80 \leq 120$, $120 \leq 180$, $180 \leq 220$ kg/m³). La literatura establece que la balsa con densidades entre 120 y 180 kg/m³ llega a presentar mayor demanda en el mercado internacional. En el Ecuador, la densidad de madera con fines comerciales usualmente va de los 100 a 170 kg/m³, característica que le confiere el título de la madera más liviana y que por tal razón es fuertemente solicitada en el mercado internacional (Aristega & Castro, 2017; Kotlarewski et al., 2016; Merchán & León, 2017; Ortiz P, 2018).

La madera, al ser un material ortotrópico, tiende a ser más complicada de analizar para encontrar correlación entre sus propiedades mecánicas. Experimentalmente, de acuerdo con la norma ASTM D143, se ha demostrado la relación existente entre las propiedades mecánicas con la densidad, en donde el módulo de elasticidad longitudinal (MOE), el módulo de ruptura (MOR), la resistencia a la compresión paralela y perpendicular a la fibra son proporcionales a la densidad bajo un comportamiento lineal, mientras que la resistencia a la cizalla paralela a la fibra tiene comportamiento no lineal. La madera debe ser sometida a un proceso de secado hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente el 12%, manteniendo una temperatura entre 20 y 23°C de acuerdo con la norma (Moncayo et al., 2018). La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas de la balsa ecuatoriana de acuerdo con la clase de densidad a la que pertenece.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas de la balsa ecuatoriana por clase de densidad

CLASE DE DENSIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA
MOE (MPa)	1154,2	1929,89	2507,25
MOR (MPa)	8,33	15,09	21,63
Compresión paralela a la fibra (MPa)	6,92	9,88	15,52
Compresión perpendicular a la fibra (MPa)	0,36	0,61	0,77
Corte (MPa)	0,72	1	1,72

Nota. Los valores presentados son un promedio del estudio realizado (Moncayo et al., 2018)

De forma general, se observa que entre más densidad presente la madera, mayor es la resistencia mecánica que llega a tener. De acuerdo con un estudio realizado en Papua Nueva Guinea, la madera con una densidad de alrededor de 150 kg/m³ llega a tener un módulo de

elasticidad de 2037 MPa, módulo de rotura 16,6 MPa, resistencia a la compresión paralela a la fibra de 9,2 MPa, compresión perpendicular a la fibra de 1,1 MPa y cizallamiento de 1,9 MPa. A continuación, se presenta un resumen en la Tabla 2 de las propiedades mecánicas clasificadas por densidad de acuerdo con las clases internacionales (Kotlarewski et al., 2016).

Tabla 2.
Balsa de Papua Nueva Guinea por clase de densidad

DENSITY CLASS	LIGHT 80 ≤ 120 kg/m ³	MEDIUM 120 ≤ 180 kg/m ³	HEAVY 180 ≤ 220 kg/m ³
MOE (MPa)	1222,14	2037,07	*
MOR (MPa)	9,83	16,63	*
Hardness Tangential Surface (N)	196,59	307,35	585,70
Hardness radial Surface (N)	233,17	290,60	566,02
Hardness axial Surface (N)	313,44	426,17	686,76
Compression parallel to the grain (MPa)	*	9,24	14,88
Compression perpendicular to the grain (MPa)	0,64	1,14	*
Shear (MPa)	1,56	1,90	*

Nota. Las áreas marcadas por ‘*’ indican que el espécimen con la correspondiente densidad no se obtuvo para el ensayo (Kotlarewski et al., 2016).

Las condiciones climáticas como la lluvia o el viento, la topografía y suelo del lugar de procedencia de la madera son otros factores que influyen en el crecimiento del árbol y, por lo tanto, en sus propiedades físicas y mecánicas (Moncayo et al., 2018). Las mayores alturas registradas corresponden a árboles que se han desarrollado en zonas húmedas, mientras que en zonas secas los árboles llegan a tener menores longitudes. Así mismo, debido a la naturaleza de la madera, sus

propiedades físicas a lo largo del eje axial del árbol, y en el caso de la densidad, esta tiende a aumentar a mayor altura, por lo que, para los ejemplares más altos, la densidad promedio será mayor (Ortiz P, 2018).

La densidad de la madera reúne las características de ser un buen indicador de calidad por presentar correlación con otras características, permitiendo emplearla como criterio de evaluación para predecir las posibilidades de uso, el rendimiento de la materia prima y los requerimientos técnicos de producción; además de que su determinación es sencilla y económica, por lo que es uno de los parámetros de más frecuente utilización en la cuantificación de las plantaciones. Existen cuatro formas de definir a la densidad de madera: densidad verde, densidad básica, densidad seca al aire y densidad seca. La densidad verde es la que posee la madera en la planta viva; densidad básica es la relación entre el peso mínimo del material (seco en estufa a 105-110°C) y su volumen verde; densidad seca al aire es la relación entre el peso de una madera estacionada que se halla en equilibrio con la atmósfera y el volumen correspondiente en estas condiciones, de forma general, se toma que su humedad es del 12%; la densidad seca está definida como la relación entre el peso y el volumen del material exento de agua. En el sector de la producción de la madera como aserraderos, se sugiere el uso de la densidad seca (Ramos et al., 2019).

De acuerdo con la Norma NTE INEN 1162:2013, para tener relación con otras propiedades de la madera y para que pueda servir como clasificación y/o evaluación previa de las propiedades mecánicas, la densidad, conocida como densidad aparente, se define como la masa de la unidad de volumen de una especie maderable con un determinado contenido de humedad. Esta norma describe el método de ensayo para determinar la densidad aparente de las maderas, donde previamente se haya determinado el contenido de humedad de la probeta según la Norma INEN

1160, la cual establece como disposiciones específicas el secado de las probetas de madera (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013; Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2012).

La densidad aparente de la madera se determina por el cociente de la masa entre el volumen, donde la masa de la pieza se determina mediante pesaje en gramos y el volumen en centímetros cúbicos. De acuerdo con la Norma NTE INEN 1162:2013, el procedimiento para encontrar la densidad aparente debe basarse en determinar la masa de la pieza y su volumen, posteriormente se realiza los cálculos con base a la siguiente relación matemática (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013):

$$D = \frac{M}{V} \quad (1.1)$$

Donde:

D = densidad aparente.

M = masa de la pieza.

V = volumen de la pieza.

1.2 Metodologías en el diseño de productos

El diseño de productos es un proceso continuo de desarrollo donde se busca obtener propuestas de solución que cubran alguna necesidad del mercado. A menudo se emplean diferentes técnicas que permitan convertir las características cualitativas que el cliente desea o requiere en valores cuantitativos que puedan ser medibles y que, por lo tanto, brinden información específica

para establecer las bases del diseño del producto. A continuación, se presentan diferentes metodologías empleadas en el desarrollo de productos que permiten sistematizar y optimizar el proceso de diseño.

1.2.1 Quality Function Deployment - QFD

El despliegue de la función de calidad o Quality Function Deployment (QFD) es una metodología de diseño de productos y servicios que reúne las necesidades y requerimientos del cliente y los traduce a parámetros de diseño y operación que satisfacen las expectativas y demandas del mercado. Esta herramienta se convirtió en un elemento integrador para las diferentes áreas relacionadas al producto como el marketing, ingeniería, operaciones, y gestión de la calidad, por lo que este método es utilizado para diseñar nuevos productos y servicios, y para modificar los existentes con el objetivo de satisfacer, hasta el más alto punto posible, los requerimientos del cliente (Wolniak, 2018; Yacuzzi & Martín, 2018).

El QFD evolucionó con base a una idea del marketing: el diseño debe reflejar los gustos y deseos de los clientes más que el potencial tecnológico o las preferencias de los ingenieros de diseño (Yacuzzi & Martín, 2018).

El empleo de la metodología QFD llega a tener diversas ventajas en la organización y desarrollo del proyecto, así como en la comunicación interfuncional y el costo-beneficio que representa. Este método se caracteriza por ser simple de implementar, analizar y documentar. Toma en cuenta los requerimientos de los clientes de forma directa y la planificación del producto se convierte en un elemento integral de la planificación de calidad. El producto se planifica con base a los requerimientos del cliente, convirtiéndola en una herramienta efectiva del marketing, mismos

que son transformados en requerimientos específicos de diseño reduciendo el tiempo empleado durante el desarrollo de cada fase del proyecto, permitiendo analizar los costos y beneficios. Además, identifica las prioridades de mejora considerando las variables que determinan la calidad de un producto o servicio, lo que a su vez brinda una ventaja competitiva y fomenta la innovación (Wolniak, 2018; Yacuzzi & Martín, 2018).

El núcleo del método QFD es un mapa conceptual que relaciona los requerimientos de los clientes con las características técnicas. Dichas relaciones se presentan en una tabla llamada Matriz de la Calidad o Casa de la Calidad (House of Quality - HoQ). La HoQ es una herramienta usada por el QFD, la cual es una matriz que provee un mapa conceptual para la comunicación y planificación interfuncional, indicando la relación entre los requerimientos del cliente (RC) y las características técnicas (CT). De forma general, el sistema QFD es categorizado en cuatro fases: planificación del producto, despliegue de parte, planificación del proceso, y fases de planificación de la producción (Marini et al., 2016; Yacuzzi & Martín, 2018). La Figura 1 muestra un ejemplo de la aplicación de la matriz de la calidad aplicado al desarrollo de un envase para un producto farmacéutico.

Figura 1.
Matriz de la calidad de un envase para un producto farmacéutico

Matriz de la calidad			P r i o r i d a d						Evaluación por el cliente		
				B	A	(-)	(=)	(+)			
(I) Nivel 1	(I) Nivel 2	(I) Nivel 3	Grado de estanqueidad del blister	5	⊖						
			Nº de veces que aparecen comprimidos foráneos	5			(VI)	⊖			
Consistencia con lo declarado en los entes de Salud Pública y con el bienestar de la población	Específico de la enfermedad para la cual dice tener acción terapéutica	Presenta sólo los comprimidos declarados	5		⊖						
		El granel se encuentra empacado en el packaging correcto	5					⊖			
Las características organolépticas de la especialidad medicinal reafirman su eficacia terapéutica	Integridad de las características apreciables del medicamento	Aspecto higiénico	3			△					
		Sin deterioro alguno	2	○		△	△				
	Las características visibles del envase confirman los atributos del medicamento	Fecha de vencimiento / lote legible	4					⊖			
		Asegura inviolabilidad	3	△							
Valor objetivo de la característica técnica y sus unidades (IV)			100%	0 vez	0 lote	50 cm	0 vez				
Evaluación técnica de dos competidores (V)			A	100%	0	0	45 cm	0			
			B	99%	1	1	49 cm	1			
Ponderación total de cada característica técnica (VII)			9	45	5	38	45				

Nota. Ejemplo de matriz de la calidad (Yacuzzi & Martín, 2018).

1.2.2 Design Thinking

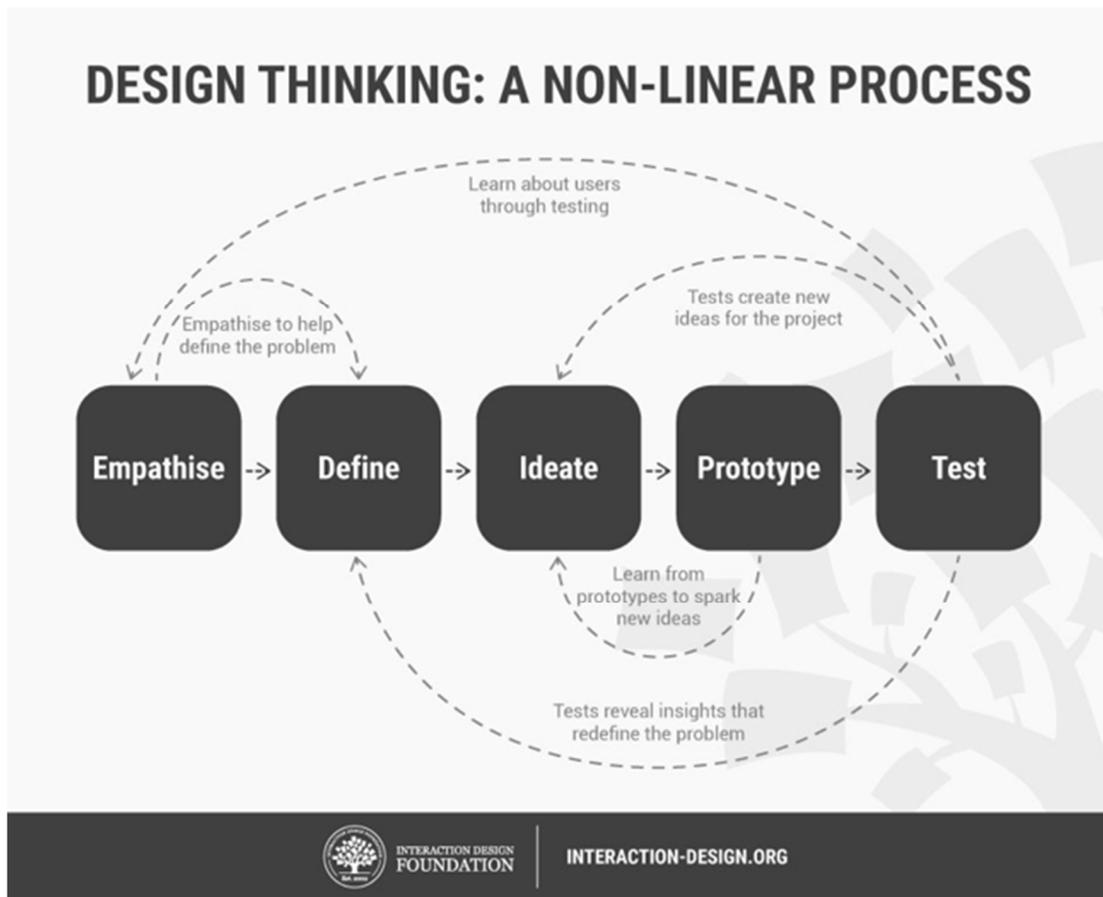
Design Thinking es un proceso o metodología de diseño que provee de un enfoque basado en el entendimiento del problema antes de plantear respuestas. Consta de 5 etapas: empatizar, definir, idear, prototipar, evaluar. Dentro de la ingeniería, la educación de diseño es un proceso

sistemático para identificar los retos y desarrollar posibles soluciones (Rao et al., 2018; Rosas et al., 2018).

Cada etapa de Design Thinking marca un importante punto que permitirá seguir avanzando al siguiente paso, sin embargo, esto no significa necesariamente que sea un proceso lineal, donde se requiera que termine una etapa antes de iniciar la siguiente. Este método se caracteriza por ser no lineal, es decir, a medida que avanza una etapa puede ser necesario regresar a otra con el fin de reformular la información de dicho punto y tomar como base esa nueva entrada, por ello es necesario conocer de qué trata cada sección. La primera etapa en el pensamiento de diseño es el empatizar, donde antes de iniciar con el proyecto es necesario realizar una completa inmersión hacia el problema, para ello se realiza un riguroso proceso de observación con el fin de reunir información y datos, así como de interactuar con las personas relacionadas y realizar múltiples preguntas para identificar las diferentes posturas sobre el problema en cuestión. En la segunda etapa se define el problema, es decir, con base a la información recolectada en la primera etapa, se identifican cuáles son las necesidades y problemas puntuales de los interesados. Posteriormente, se continúa a la etapa de la ideación donde se empieza a pensar sobre las posibles soluciones que se hayan identificado durante las etapas iniciales. La cuarta etapa es el prototipado, el cual requiere de elegir una de las posibles soluciones consideradas y realizar un prototipo de dicha idea para observar la respuesta de los interesados, dicho prototipo puede ser algo físico o virtual y marca el inicio del diseño del prototipo final que se convertirá, con un proceso de evaluación, en el producto optimizado. La quinta etapa en el pensamiento de diseño es la evaluación, donde el prototipo es sometido a una evaluación bajo diferentes condiciones y, una vez que la solución planteada muestre ser una respuesta satisfactoria al problema, entonces se evidencia el resultado obtenido. Por último, se puede realizar un paso adicional que consiste en la implementación del producto, para lo cual es

necesario realizar una búsqueda de artículos, patentes o productos que sean similares al diseño planteado, si se llega a encontrar cualquiera de estos entonces el prototipo ha fallado por revisión. Sin embargo, si no se ha encontrado trabajos previos entonces la aplicación a una patente puede ser considerada (Rao et al., 2018). La Figura 2 muestra las 5 etapas base en el pensamiento de diseño y cómo estas no requieren seguir un proceso lineal.

Figura 2.
Design thinking: a non-linear process



Fuente: <https://www.interaction-design.org/>

1.2.3 Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)

El Diseño para la Manufactura y Ensamble es un proceso de ingeniería diseñado para optimizar la relación entre diseño, manufactura y ensamble, convirtiéndolo en la práctica de diseñar productos tomando en cuenta la fabricación y que así puedan ser diseñados en menor tiempo y con el menor costo de desarrollo. Los primeros pensamientos de todos los diseñadores se relacionan al material, forma, proceso de fabricación y quién va a fabricar. Durante la década de los 80's se ha ido cambiando la mentalidad y las metodologías en el diseño de productos con ayuda de la introducción del Computer-Aided Design (CAD). El Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA) fue también introducido durante este tiempo el cual ha permitido analizar un producto. Las principales ventajas de este proceso es que busca reducir el número de partes, mejorando la capacidad de manufactura y facilitando el ensamblaje, el cual suele representar gran porcentaje del costo de un producto (Naiju, 2021).

Durante los últimos años se ha presentado un cambio filosófico en cuanto al diseño de productos, el cual determina el método de fabricación, el ensamble, las tolerancias de los componentes, el número de ajustes y el tipo de herramientas de mecanizado requeridas. Diferentes métodos en el diseño para la manufactura y ensamble se han desarrollado con el paso del tiempo y han permitido tener una guía en la industria para reducir el costo de los productos, al mismo tiempo que se mejora la calidad. El DFMA es una de estas metodologías y consiste en tomar en cuenta algunas consideraciones durante la etapa preliminar de diseño, de tal manera que se evite posteriores imprevistos debido a correcciones en el diseño que se identifican durante el proceso de manufactura, y es que algunos productos llegan a fallar o son eliminados debido a los altos costos,

baja calidad, una introducción al mercado tardía o simplemente la producción no puede cubrir la demanda del mercado (Bayoumi, 2014; Kallewaard Echeverri et al., 2016).

El DFMA llega a ser un compendio de otras metodologías que buscan la optimización de la manufactura y el ensamble, todo esto con el objetivo de mejorar la calidad y reducir costos. De esta manera, se presentan los dos componentes del DFMA. El primero es el DFA (Design for Assembly) o Diseño para el Ensamble, en donde se evalúa la utilidad o valor funcional de cada parte, tratando así de reducir el número de piezas independientes, de tal forma que se evalúe la posibilidad de integrar varias partes o incluso de eliminar algunas que no sean necesarias. El segundo componente es el DFM (Design for Manufacture) o Diseño para la Manufactura busca automatizar los procesos de fabricación o tratar de reducir la intervención manual con el objetivo de disminuir las posibilidades de obtener piezas con errores de fabricación a causa de la intervención humana, así mismo, tiene por objetivo la utilización de piezas estandarizadas de tal forma que las partes que requieran ser manufacturadas estén presentes en una menor cantidad, lo que representa a su vez menores tiempos de fabricación (Bayoumi, 2000; Kallewaard Echeverri et al., 2004).

Algunos aspectos fundamentales del DFA y DFM se listan a continuación:

1. Simplificar el diseño y número de piezas.
2. Usar partes estandarizadas y materiales comunes.
3. Diseñar para la facilidad de fabricación.
4. Diseñar dentro de las capacidades de proceso y evitar detalles innecesarios.
5. Diseño y ensamble a prueba de errores.
6. Diseñar por manipulación y orientación de partes.
7. Minimizar partes flexibles e interconexiones.

8. Diseñar productos modulares para la facilidad de ensamble.
9. Diseñar para producción automatizada.
10. Evitar obstrucciones visuales.
11. Evitar partes que se enreden.
12. Diseñar partes que cumplan varias funciones.
13. Diseñar partes simétricas o con exagerada asimetría.
14. Minimizar movimientos en el ensamble.
15. Eliminar o simplificar ajustes.

Tomando en cuenta los aspectos antes mencionados, el DFMA también presenta una sinergia del DFA y el DFM, por lo que se resumen los siguientes pasos:

1. Analizar el número de partes en un producto o ensamblaje.
2. Simplificar el diseño general minimizando el número de partes para facilitar el ensamblaje.
3. Simplificar el diseño de elementos mediante el uso de componentes estandarizados.

De esta manera se puede obtener el resultado más beneficioso de aplicar DFMA, el cual es la reducción de partes en el ensamblaje, reducción de gastos generales de manufactura, reducir tiempo de ensamble e incrementar la calidad reduciendo las posibilidades de introducir defectos en el diseño (Naiju, 2021).

1.3 Sistemas de medición

Un sistema de medición se basa en procedimientos, instrumentos de medida, software y personal para asignar un valor a la característica que está siendo medida. Su evaluación consiste en determinar la capacidad y estabilidad por medio de estudios de repetibilidad, reproducibilidad,

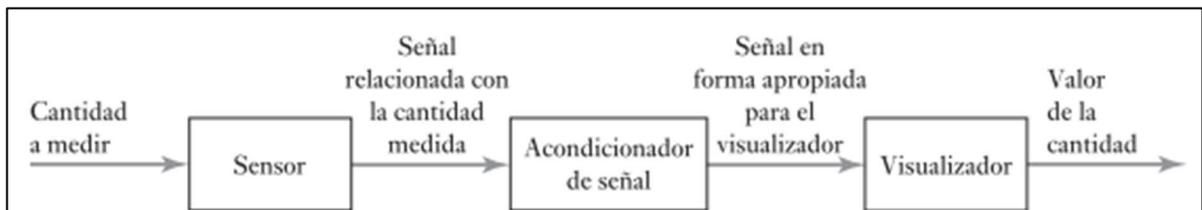
linealidad y exactitud. Es necesario realizar la calibración del instrumento, la cual se define como el conjunto de operaciones que, bajo condiciones específicas, debe evidenciar la relación entre los valores indicados por el instrumento y el valor correspondiente considerando el patrón de referencia. Durante el empleo del instrumento de medición, la calibración deberá controlarse de acuerdo con las condiciones de trabajo. Cuando el estado de funcionamiento y exactitud adecuados han sido alcanzados entonces se define que el instrumento ha sido ajustado (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981; Mejia & Alvarez, 2011).

En relación con los conceptos que involucra un sistema de medición, es importante tomar en cuenta cuando se habla de exactitud y precisión, además, los errores asociados con cálculos y medidas pueden ser caracterizados con respecto a estos dos parámetros. Precisión se refiere a la variación o dispersión de las lecturas del instrumento de medición; poca variación, dado un mismo objeto de estudio, significa un alto grado de precisión, permitiendo tener repetibilidad en el estudio. Por otro lado, exactitud se refiere a la cercanía entre el valor medido y el valor verdadero, cuanto mayor es la cercanía entre estos valores, más alto es el nivel de exactitud (Chapra & Canale, 2015; Mejia & Alvarez, 2011).

Los sistemas de medición están formados por tres elementos básicos (Bolton, 2017):

1. Un sensor que responda a la cantidad a medir al dar como salida una señal relacionada con la variable de interés.
2. Un acondicionador de señal que tome la señal del sensor y la manipule para acondicionar con el fin de presentar de forma visual o para ejercer una acción de control.
3. Un sistema visualizador donde se muestra la salida desde el acondicionador de señal.

Figura 3.
Sistema de medición y elementos que lo forman



Fuente: (Bolton, 2017)

Dentro de los sistemas de medición es necesario la utilización de sensores o transductores. El término sensor se refiere a un elemento que emite una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. De forma simultánea, un transductor es un elemento que al ser sometido a un cambio físico experimenta un cambio relacionado, permitiendo la transformación de una magnitud física en otra, normalmente eléctrica. La señal de salida del sensor debe ser procesada de forma adecuada como preparación para la siguiente etapa de operación tal como muestra la figura 3. A continuación, se describen algunos procesos del acondicionamiento de señales (Bolton, 2017):

1. Protección para evitar daños a otros elementos como microprocesadores como consecuencia de elevado voltaje o corriente.
2. Modificación de la señal a una de tipo adecuado como la conversión de analógica a digital o viceversa.
3. Obtener el nivel adecuado de la señal mediante amplificación.
4. Reducción o eliminación del ruido con la utilización de filtros.

1.4 El diseño mecánico

Diseñar es planificar con el objetivo de satisfacer una necesidad específica o resolver un problema en particular, se caracteriza por ser un proceso innovador con múltiples fases interactivas. Los aspectos de incertidumbre siempre se encuentran presentes durante el diseño en ingeniería y se aborda, típicamente, mediante el concepto de factor de diseño y factor de seguridad, ya sea en forma determinista o en sentido estadístico, el cual hace referencia a la confiabilidad del diseño (Budynas & Nisbett, 2019).

La supervivencia de un elemento mecánico se relaciona directamente con el esfuerzo y la resistencia, y depende de la forma en que el diseñador ajusta el esfuerzo inducido por la carga de tal forma que sea menor que la resistencia en un punto de interés. La resistencia es una propiedad de los materiales o de un elemento mecánico, la misma que depende de la selección, el tratamiento y el procesamiento del material. Por otro lado, el esfuerzo es una propiedad de estado de un cuerpo en un punto específico, la cual está en función de la carga aplicada, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura. Las propiedades mecánicas de los materiales requieren un estudio con ensayos destructivos y no destructivos, de tal manera que se pueda obtener la curva esfuerzo-deformación del material y, por lo tanto, sus características.

Un enfoque general del problema de la carga permisible contra la carga de pérdida de función es el método del factor de diseño determinístico, conocido también como método clásico de diseño. Donde deben analizarse todos los modos de pérdida de función, y el modo que conduzca al factor de diseño más pequeño será el modo gobernante. Después de culminar el diseño, el factor de diseño real puede cambiar como resultado de modificaciones como el redondeo a un tamaño estándar de una sección transversal o el uso de componentes recién lanzados con clasificaciones

más altas en lugar de emplear lo que se había calculado usando el factor de diseño. En este caso, el factor de diseño se conoce como factor de seguridad, n , que tiene la misma definición que el factor de diseño, pero por lo general difiere en su valor numérico.

Es posible describir la resistencia estructural en términos de la carga o el esfuerzo contra la resistencia, sin embargo, las fallas de funcionamiento por razones estructurales pueden surgir de factores como las deformaciones o deflexiones excesivas (Budynas & Nisbett, 2019).

La selección del material para la construcción de la parte de una máquina o elemento estructural es una de las consideraciones más importantes que debe tomar en cuenta el diseñador. Por lo general, esta decisión se toma antes de establecer las dimensiones de la pieza. Aunque el esfuerzo y la deflexión son aspectos importantes en el proceso de diseño, la selección del material no siempre se basa en dichos factores. Hay muchas piezas que no llegan a soportar cargas en ningún momento y son diseñadas únicamente para llenar espacios o por cuestiones estéticas, sin embargo, existen muchos otros factores que pueden condicionar el diseño de piezas. Es necesario conocer las condiciones de trabajo a las que estará sometida la pieza mecánica o elemento estructural, de esta manera se puede elegir el factor de diseño más adecuado (Budynas & Nisbett, 2019).

Existen diversas teorías para el diseño de partes de máquina o elementos estructurales basadas en los criterios de fluencia para materiales dúctiles y criterios de fractura para materiales frágiles. De manera general, se puede hacer uso del factor de seguridad como indicador para determinar si el elemento está adecuadamente diseñado para las condiciones de carga definidas (Budynas & Nisbett, 2019). El progreso tecnológico ha posibilitado el surgimiento de potentes paquetes de software que permiten al diseñador valerse de estos instrumentos para optimizar el tiempo de desarrollo de un producto y valerse de herramientas como el diseño asistido por

computador (Computer Aided Design – CAD), manufactura asistida por computador (Computer Aided Manufacturing – CAM) e ingeniería asistida por computador (Computer Aided Engineering – CAE), con el fin de obtener modelos virtuales que satisfagan los requerimientos de diseño, tomando en cuenta los procesos de manufactura y complementar con el análisis de resistencia bajo las condiciones de carga especificadas.

1.4.1 El método de elementos finitos (Finite Element Method – FEM)

Es un método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales. Se emplea en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos. Se basa en la transformación de un problema complejo a una cantidad finita de problemas más simples, subdividiendo el modelo en múltiples elementos. Cada elemento comparte puntos comunes con los de su alrededor mediante nodos, los cuales estarán sometidos a las condiciones de carga definidas para el diseño. Su aproximación se basa en los siguientes puntos (Zienkiewicz, 2018):

- a) El modelo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número finito de elementos.
- b) Los elementos se conectan entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de los nodos serán las incógnitas fundamentales del problema.
- c) Se toma un conjunto de funciones que definan el campo de desplazamiento dentro de cada elemento finito en función de los desplazamientos de los nodos que lo forman.

- d) Las funciones definirán de forma única el estado de deformación, las cuales, junto con las formaciones iniciales y propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en el elemento.
- e) Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, de tal manera que se equilibren las tensiones en el contorno y las condiciones de carga aplicadas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.

En el caso de estructuras, la aplicación del método de elementos finitos busca obtener las siguientes magnitudes (Cabal, 2014):

- Esfuerzos en cada barra
- Desplazamientos de los nodos
- Reacciones en los apoyos

El desarrollo tecnológico y en especial de los paquetes de software, las computadoras han implementado el método de elementos finitos para realizar, de manera automática y bajo las condiciones ingresadas, el análisis de elementos finitos (Finite Element Analysis – FEA).

1.5 Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos o empotrados (SE) se definen como un sistema electrónico o módulo diseñado específicamente para realizar cierto tipo de funciones, formando habitualmente un sistema de mayor entidad. La característica principal es que llegan a emplear uno o varios procesadores digitales en formato de circuitos integrados, también conocidos como chips o microchips, permitiendo aportar funcionalidad al sistema anfitrión. Existen diferentes formatos de

presentación para el núcleo de estos módulos tales como los microprocesadores y microcontroladores (Úbeda, 2009).

1.5.1 Microprocesadores

El microprocesador, también llamado unidad de procesamiento central (CPU) o unidad microprocesadora (MPU), es un circuito integrado digital que puede ser programado con una serie de instrucciones para realizar diversas operaciones con base a los datos. Se compone de varias unidades específicas que tienen cierto diseño y organización al cual se denomina arquitectura. Existen cuatro unidades básicas que son comunes en los microprocesadores: la unidad aritmético-lógica (ALU, Arithmetic Logic Unit), el decodificador de instrucciones, la unidad de control y la matriz de registros. Todos funcionan con un conjunto de operaciones que implementan las operaciones básicas, su conjunto de instrucciones puede clasificarse en siete grupos básicos (Floyd, 2016):

- Transferencia de datos
- Aritméticas y lógicas
- Manipulación de bits
- Manipulación de cadenas
- Subrutinas e interrupciones
- Bucles y saltos
- Control

Un microprocesador ejecuta un programa repitiendo constantemente los tres siguientes pasos:

1. Extrae una instrucción de la memoria y la coloca en la CPU.
2. Decodifica la instrucción y se actualiza el contador de programa para que apunte a la instrucción siguiente. Si la instrucción decodificada requiere alguna otra información entonces extrae dicha información.
3. Ejecuta la instrucción y los resultados se devuelven a los registros y a la memoria (Floyd, 2016).

1.5.2 Microcontroladores

Los microcontroladores son computadoras que no llegan a tener grandes espacios de memoria ya que están destinados a optimizar una serie de tareas. Contiene circuitos y funciones especializadas aplicables al diseño de sistemas mecatrónicos. Los componentes básicos de un microcontrolador incluyen una CPU, puertos de entrada y salida, memoria, y, usualmente, un convertidor análogo-digital (ADC). Otros componentes pueden incluir temporizadores, generadores de reloj, y contadores de eventos. Algunos ejemplos son los PIC de Microchip, el 68HC11 de Motorola y el 8096 de Intel (Alciatore & Hestand, 2016; Westcott & Westcott, 2018).

Los microcontroladores deben ser codificador con instrucciones que la CPU entienda. Las instrucciones más básicas están en lenguaje máquina el cual se compone únicamente de ceros y unos, sin embargo, el lenguaje máquina llega a ser complicado de entender por lo que el lenguaje ensamblador es utilizado para traducir los comandos básicos al lenguaje máquina. Dos microcontroladores populares han sido desarrollados para el esquema de código abierto: las plataformas Arduino y Netduino (Westcott & Westcott, 2018).

Los microcontroladores llegan a tener un amplio rango de aplicaciones como aparatos electrodomésticos, equipo de entretenimiento, equipo de telecomunicación, automóviles, camiones, aviones, juguetes y equipo de oficina. Su característica de contar con puertos I/O digitales permiten la transferencia de datos binarios hacia y desde el microcontrolador utilizando pines externos en la placa. Estos pines se pueden utilizar para la lectura de estado de sensores, encendido y apagado de interruptores, control de pantallas digitales, así como para poner interfaces con convertidores externos analógico a digital o digital a analógico, también permite el control de encendido y apagado de motores. Algunos microcontroladores varios estándares o protocolos de comunicación serial, que incluyen el SPI (interfaz periférica serial), I2C (circuito Inter integrado), UART (unidad asíncrona de recepción y transmisión) y USART (unidad síncrona asíncrona de recepción y transmisión) (Alciatore & Histan, 2016).

Capítulo II

Metodología de diseño

Se establece la metodología a seguir para el diseño del dispositivo, para ello se determina una serie de etapas basadas en cada fase de la metodología Design Thinking.

2.1 Primera Etapa: Obtención de información

En esta primera etapa se busca empatizar con el cliente, es decir, se requiere obtener información de fuentes primarias que permitan conocer algunos parámetros del entorno o condiciones de trabajo a las que estará sometido el dispositivo.

Así mismo, se busca organizar la información obtenida de manera que permita tener parámetros cuantitativos de clasificación, para ello se planea utilizar la metodología QFD como medio para establecer qué características son las que llegan a presentar mayor importancia para las partes interesadas y determinar niveles de prioridad durante la ejecución de la fase de diseño.

2.2 Segunda Etapa: Definición de problema y determinación de parámetros de diseño

La segunda etapa se centra en definir el problema con base a la información obtenida en la primera etapa. La implementación de la matriz QFD en la primera etapa permite obtener características cuantitativas para cada parámetro, por lo que en esta fase será posible establecer los criterios de diseño que llegan a ser prioritarios en comparación con el resto.

2.3 Tercera Etapa: Diseño del dispositivo

El proceso de diseño se inicia en esta tercera etapa, para ello se toma en cuenta los parámetros definidos previamente, así como los componentes principales que conforman el dispositivo para su funcionamiento.

2.3.1 Diseño de estructura

La estructura del dispositivo debe considerar la selección de material adecuada de acuerdo con los requerimientos y restricciones de diseño, así mismo, debe tomar en cuenta procesos de fabricación y de ensamblaje, tal como lo menciona la metodología DFMA. Para un adecuado desarrollo de este proceso, se planea la utilización de software de diseño asistido por computador (CAD), el cual permite trabajar con modelos digitales para tener una previsualización del modelo real.

Por otro lado, se debe complementar el desarrollo del diseño con simulaciones basadas en análisis de elementos finitos con el objetivo de conocer la resistencia del modelo propuesto frente a las condiciones de trabajo a las que estará sometido el dispositivo.

2.3.2 Diseño de acoples para dispositivos electrónicos

El proceso de diseño para generar acoples y carcasas para los diferentes dispositivos electrónicos debe realizarse de manera similar al proceso de diseño de la estructura, es decir, toma en cuenta la aplicación de software CAD y criterios de fabricación y ensamblaje.

2.3.3 Diseño de esquemas de conexión

Los esquemas de conexión marcan el cableado de todos los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del dispositivo, mismos que deben estar ubicados de manera adecuada evitando estar expuestos a posibles riesgos que causen errores durante el manejo del dispositivo. El empleo de software CAD como herramienta para la aplicación de la metodología DFMA permite tener un modelo digital en el cual se ubiquen todos los cables en lugares apropiados.

Además, todos los sistemas embebidos deben conectarse entre sí de forma tal que la alimentación y comunicación se ejecute de forma correcta.

2.4 Cuarta Etapa: Implementación del dispositivo

Una vez se ha completado la fase de diseño del dispositivo contemplando todos los aspectos necesarios, se procede con la implementación física de este en la cuarta etapa que se centra en el prototipado.

2.4.1 Construcción de la estructura

La construcción de la estructura del dispositivo representa la primera fase en el proceso de implementación, debido a que en esta se apoyarán las demás piezas complementarias. Además, debe considerar todos los parámetros tomados en cuenta durante la etapa de diseño como dimensiones, forma, material y procesos de fabricación.

2.4.2 Construcción de acoples y carcasas

De manera similar al proceso de construcción de la estructura, la fabricación de los diferentes acoples y carcasas del dispositivo debe efectuarse siguiendo el diseño planteado durante la segunda etapa.

2.4.3 Integración de elementos mecánicos y electrónicos

Una vez se haya obtenido todas las piezas de fabricación, junto con todos los elementos estandarizados, se procede con la ejecución del ensamblaje siguiendo los planos de conjunto respectivos.

2.4.4 Desarrollo de algoritmos de control

Una vez todo el dispositivo ha sido ensamblado y las conexiones han sido establecidas, se procede con el desarrollo de software que involucra la generación de los algoritmos de control para cada una de las partes que conforman el dispositivo: adquisición de datos, procesamiento y visualización.

2.5 Quinta etapa: Validación de funcionamiento

La quinta etapa se basa en la evaluación del prototipo, para ello se debe haber completado satisfactoriamente las etapas anteriores. La calibración de sensores debe efectuarse de manera eficiente para tratar de reducir los errores de medición, por lo que durante las pruebas de funcionamiento se debe ir ajustando los parámetros respectivos de tal forma que el sistema permita obtener los valores adecuados en relación con las dimensiones reales de lo que se está midiendo.

Capítulo III

Resultados

A continuación, se inicia el proceso descrito en la metodología a fin de determinar los parámetros de diseño del dispositivo para su implementación.

3.1 Resultados Primera Etapa: Requerimientos y restricciones de diseño

De acuerdo con la información proporcionada por el cliente y la empresa auspiciante Ingenious Works, se cuenta con las siguientes características a considerar durante la fase de diseño.

3.1.1 Dimensiones

La información proporcionada por la empresa auspiciante menciona el rango de medidas de la madera de balsa en presentación de listones (sección transversal rectangular), los mismos que se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Rango de medidas de madera de balsa en presentación de listones

	LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)
Valor mínimo	30	5	5
Valor máximo	130	25	25

Fuente: empresa auspiciante

3.1.2 Condiciones de trabajo

El dispositivo está rodeado de un movimiento constante de trabajadores que transportan productos derivados de la madera, así como de herramientas y otros elementos que afectan directa

o indirectamente el área de trabajo del operario encargado de medir la densidad en los listones de madera de balsa, lo cual en algunas ocasiones requiere que el área de trabajo sea reubicada. La presencia de polvo proveniente de la madera debido al mecanizado de esta o a su transporte y fricción con otros elementos, es otra característica que tomar en cuenta durante la fase de diseño del dispositivo. Por otro lado, el operario deberá mantenerse de pie durante el desarrollo de la actividad laboral relacionada a la toma de medidas de los listones de madera de balsa, donde toma los listones del bloque objetivo y los mide para posteriormente reubicarlo.

Con base a lo antes descrito se emplea la metodología QFD (Quality Function Deployment) para conocer los requerimientos del cliente que se relacionan a las condiciones de trabajo a las que estará sometido el dispositivo. Las características observadas se muestran a continuación:

- Producto resistente
- Sistema estable
- Relativamente liviano
- Cómodo de utilizar
- Relativamente económico
- Fácil uso para el usuario

Se solicita al cliente asigne un valor del 1 al 10 que represente el nivel de importancia para cada característica, donde 1 representa que no importa si no se cumple con dicha propiedad y 10 indica que es completamente importante. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

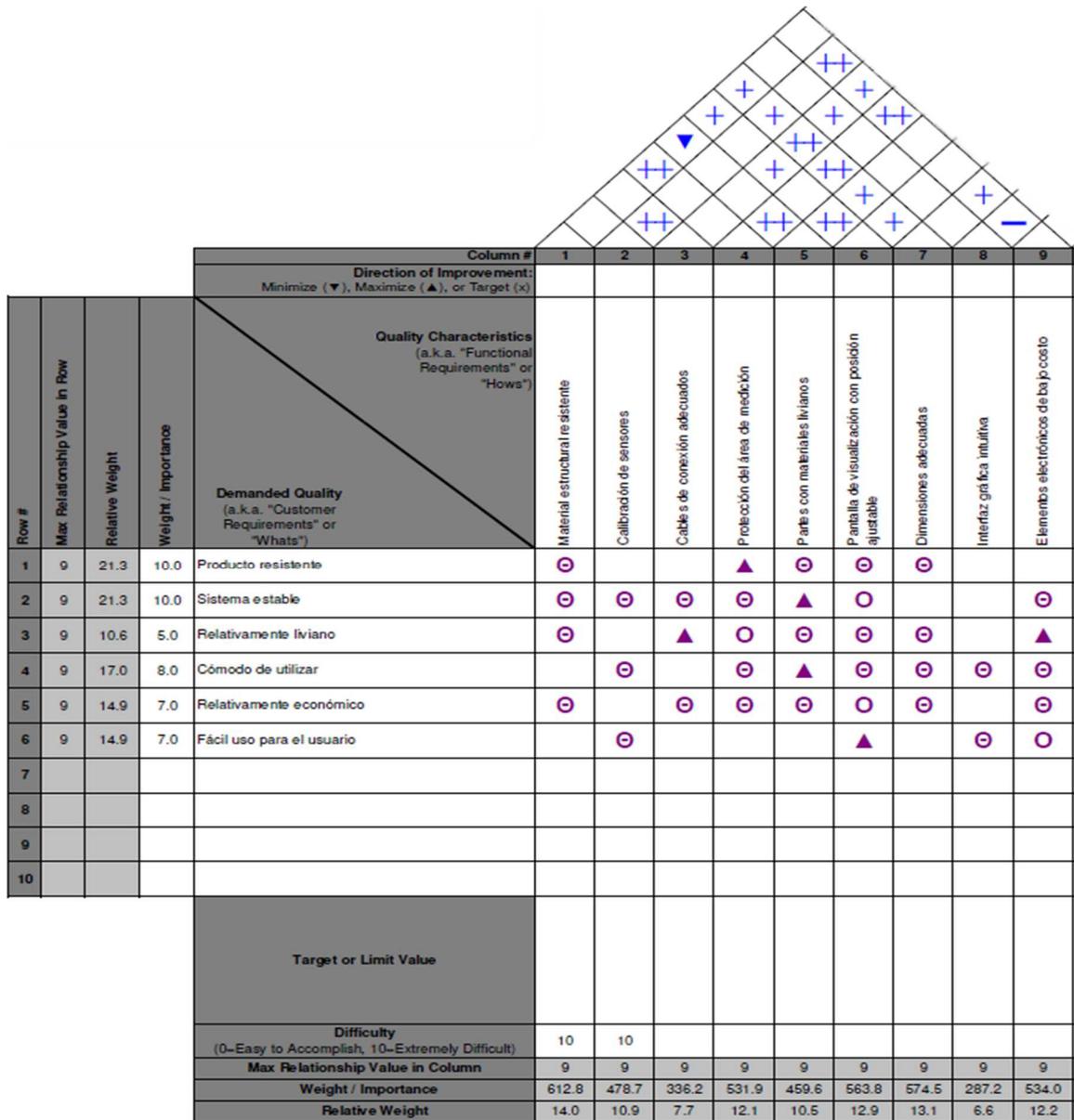
Nivel de importancia de los requerimientos del cliente

CARACTERÍSTICA	NIVEL DE IMPORTANCIA
Producto resistente	10
Sistema estable	10
Relativamente liviano	5
Cómodo de utilizar	8
Relativamente económico	7
Fácil uso para el usuario	7

Fuente: autor

Con base a los requerimientos de la Tabla 4 se procede a realizar la Matriz de Calidad para transformar la voz del cliente a parámetros de diseño.

Figura 4.
Casa de la calidad con base a los requerimientos del cliente



Fuente: autor

De acuerdo con la Figura 4 se obtiene los siguientes pesos relativos para cada parámetro de diseño considerado que pueda satisfacer los requerimientos del cliente.

Tabla 5.
Pesos de cada parámetro de diseño

PARÁMETRO	PESO RELATIVO
Material estructural resistente	14,0
Calibración de sensores	10,9
Cables de conexión adecuados	7,7
Protección del área de medición	12,1
Partes con materiales livianos	10,5
Pantalla de visualización con posición ajustable	12,9
Dimensiones adecuadas	13,1
Interfaz gráfica intuitiva	6,6
Elementos electrónicos de bajo costo	12,2

Fuente: autor

3.2 Resultados Segunda Etapa: Definición de problema

Una vez se cuenta con los parámetros de diseño obtenidos a partir de los requerimientos del cliente, y sus respectivos niveles de importancia, se procede a ejecutar la etapa para definir la problemática.

El diseño del dispositivo debe priorizar un material estructural resistente, seguido de mantener las dimensiones adecuadas, es decir, no debe estar sobredimensionado con longitudes más grandes de lo requerido y debe tratar de cumplir con las dimensiones mínimas que permitan comodidad al operario. La pantalla de visualización debe tener una posición ajustable y se debe considerar la utilización de elementos electrónicos de bajo costo. El área de medición debe estar protegida para evitar posibles daños y se debe tomar en cuenta la calibración de los sensores para reducir el error de medición. Es posible examinar la utilización de materiales livianos para algunas piezas complementarias del dispositivo. Los cables de conexión, a pesar de no representar un alto nivel de importancia para el cliente, es preferible implementar los adecuados para evitar posibles interferencias en las señales que se transmitirán mediante estos. Por último, la interfaz gráfica, si bien no es una prioridad, se tomará en cuenta un diseño amigable e intuitivo. Todo el proceso de diseño debe evaluar la disponibilidad de materia prima, así como de los procesos de fabricación, tomando en cuenta las recomendaciones de la metodología DFMA.

Se debe considerar los elementos necesarios que requiere el dispositivo para su funcionamiento.

1. Material estructural
2. Sensores de distancia
3. Sensor de masa
4. Sistemas embebidos
5. Elementos de visualización

3.3 Resultados Tercera Etapa: Diseño del dispositivo

El diseño del dispositivo se contempla en la tercera etapa de la metodología, la cual consiste en el idear una solución con base a los parámetros de diseño definidos.

3.3.1 Selección de material estructural

Para la selección del material estructural del dispositivo se considera diferentes materiales disponibles en el mercado local que, por sus propiedades mecánicas, pueden representar una alternativa de solución. La Tabla 6 muestra las características de cada material en relación con los parámetros requeridos de diseño.

Tabla 6.
Selección del material estructural

	ACERO ASTM A-513	ALUMINIO AA 6063	MADERA DE PINO
Módulo de elasticidad (GPa)	207	71,70	10.80
Peso específico (kN/m ³)	76,5	26,6	3,82
Costo relativo	Alto	Medio	Bajo

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2019)

La estructura del dispositivo debe ser resistente, el cual es el punto de mayor importancia de acuerdo con los valores obtenidos al aplicar QFD. Por lo cual se considera, con base a la Tabla 6, que el material estructural deberá ser acero. A pesar de que este material puede representar un mayor peso, para el cliente no es prioridad que el producto sea liviano.

3.3.2 Selección de sensores de distancia

En cuanto a los sensores de distancia, existen diversos tipos de sensores que permiten medir esta magnitud física. Tomando en cuenta la disponibilidad en el mercado local, se encuentran los basados en movimiento mecánico como el encoder lineal magnético TMLS-05A-02, el cual cuenta con un cabezal que se mueve a lo largo de una cinta magnética y emite una señal dependiendo de la ubicación de dicho cabezal; pulsos de sonido como el HC – SR04 el cual emite una onda sonora que rebota en la superficie y retorna de nuevo al sensor, para lo cual se calcula el tiempo que la onda ha tardado desde la emisión hasta su recepción; láser como el TOF10120 el cual mide el tiempo de vuelo del haz de luz; infrarrojos como el GP2Y0A21 que emite una señal infrarroja que rebota en la superficie y retorna al receptor del sensor.

A continuación, se realiza una comparación entre los sensores disponibles en el mercado local tomando en consideración las siguientes características:

- Partes móviles
- Distancia mínima de medición
- Distancia máxima de medición

Tabla 7.
Sensores de distancia

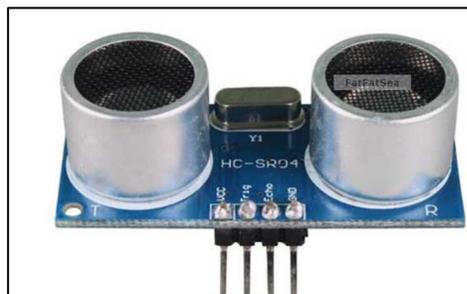
	TMLS-05A-02	HC-SR04	TOF10120	GP2Y0A21
Partes móviles	Si	No	No	No
Distancia mínima de medición (cm)	35	2	10	10
Distancia máxima de medición (cm)	500	400	180	80

Fuente: (Indoware, 2013; SGS, 2014; SHARP, n.d.)

De acuerdo con las recomendaciones de la metodología DFMA, se debe minimizar o eliminar componentes que contengan partes móviles, por lo que el sensor TLMS-05A-02 se descarta como alternativa de solución. Por otro lado, de la Tabla 7 se aprecia que el sensor GP2Y0A21 tiene una distancia máxima de medición de 80 cm que, de acuerdo con la Tabla 3, los listones más largos llegan a presentar longitudes de hasta 130 cm, por lo que este sensor no puede ser considerado como alternativa de solución.

Los sensores resultantes que cumplen con los requisitos en cuando a rangos de medición son el HC-SR04 y el TOF10120. Sin embargo, tal como muestra la Figura 5, el sensor HC-SR04 contiene dos rejillas que protegen el emisor y receptor de la onda sonora. Este tipo de configuración podría resultar ineficiente al trabajar en ambientes con alta presencia de polvo que tendería a filtrarse y afectar las lecturas del sensor. Por otro lado, la Figura 6 muestra el sensor TOF10120, el cual no cuenta con partes expuestas que puedan verse afectadas por el polvo, por tal razón este sensor es el seleccionado como alternativa de solución.

Figura 5.
Sensor HC-SR04



Fuente: (Indoware, 2013)

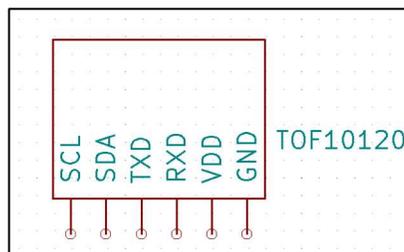
Figura 6.
Sensor TOF10120



Fuente: (SGS, 2014)

El sensor TOF10120 cuenta con seis pines de conexión mostrados en la Figura 7.

Figura 7.
Pines sensor TOF10120



Fuente: autor

La Tabla 8 resume los pines de conexión de este sensor y la función de cada uno.

Tabla 8.
Función de los pines sensor TOF10120

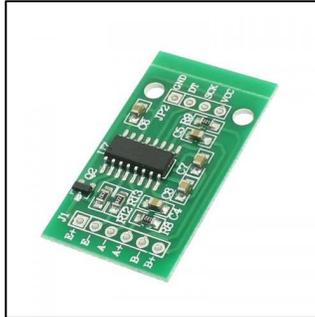
PIN	FUNCIÓN
SCL	I2C Reloj
SDA	I2C Data
TXD	Serial TX
RXD	Serial RX
VDD	3 – 5 V
GND	GND

Fuente: autor

3.3.3 Selección de sensor de peso

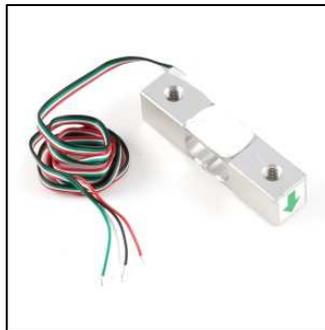
Los sensores de peso se basan en la utilización de galgas extensiométricas contenidas en barras rectangulares para medir la fuerza aplicada, tal como se muestra en la Figura 9. En el mercado local solo se encuentran disponibles este tipo de sensores, junto con el módulo HX711 que acondiciona y amplifica la señal del sensor, por lo que este sensor será el considerado como alternativa de solución. La Figura 8 muestra el módulo HX711 el cual se integra a la celda de carga para establecer comunicación con el sistema de procesamiento.

Figura 8.
Módulo HX711



Fuente: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-hx711-para-sensor-de-peso/>

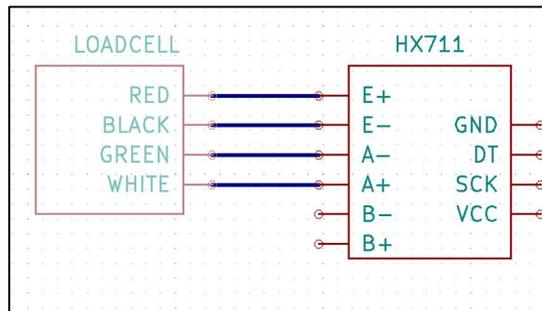
Figura 9.
Celda de carga



Fuente: <https://dynamoelectronics.com/tienda/celda-de-carga-de-10kg-tal220/>

La celda de carga se conecta al módulo HX711 y este último envía la señal de lectura al dispositivo de procesamiento. La Figura 10 muestra el esquemático del ADC HX711 y los pines de conexión de la celda de carga. A su vez, indica los pines que se conectan a la placa de procesamiento donde GND corresponde a tierra, DT es la señal de datos, SCK la señal de reloj y VCC es el pin de alimentación que va de 2,7 a 5,5 V (Avia, 2017).

Figura 10.
Conexión celda de carga y HX711



Fuente: autor

3.3.4 Selección de sistemas embebidos

Para la selección de sistemas embebidos se considera la disponibilidad de añadir elementos externos, por lo que el dispositivo debe contar con puertos de entrada/salida. En el mercado local diversos dispositivos cuentan con esta característica, siendo los más demandados comercialmente: Raspberry Pi, Arduino y ESP8266. Por otro lado, se debe tomar en cuenta los dispositivos seleccionados previamente y analizar qué tipo de comunicación requiere ser establecida entre estos y la unidad de procesamiento.

La Tabla 9 muestra una comparación entre las placas contempladas como posible propuesta de solución, tomando en cuenta las siguientes características:

- Pines para comunicación I2C
- Número de puertos para comunicación serial
- Pines de entrada analógicos

Tabla 9.
Comparación sistemas embebidos

	RASPBERRY PI 3	ARDUINO UNO	ARDUINO MEGA	ESP8266
Pines comunicación I2C	Si	Si	Si	Si
Número de puertos para comunicación serial	1	1	3	1
Pines entrada analógico	No	Si	Si	Si

Fuente: autor

Considerando el requerimiento de tres sensores de distancia para la obtención de medidas correspondientes a las tres dimensiones y, tomando en cuenta la Tabla 8, es posible conocer que el sistema embebido debe tener capacidad de comunicación I2C, así como comunicación serial para los tres sensores TOF10120. La Tabla 9 muestra que el dispositivo más adecuado a implementar es el Arduino Mega 2560, el cual permite la comunicación I2C, cuenta con tres puertos extras para comunicación serial y tiene pines de entrada para señales analógicas, por lo que esta placa se considera como alternativa de solución.

3.3.5 Selección de elemento de visualización

De acuerdo con la norma NTE INEN-ISO 9241-400 y el INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO de España, un dispositivo de entrada debe seguir el concepto de utilidad, el cual postula que el objeto no tiene utilidad inherente, pero tiene utilidad en un contexto específico de uso, para unos objetivos y unos usuarios específicos, por lo que el producto puede estar diseñado para una población de usuarios prevista y para un contexto de uso restringido. El diseño y selección de equipos requiere alcanzar una adecuación entre un rango de

requisitos de la tarea y las necesidades de los usuarios. Para el caso de pantallas de visualización de datos, se debe asegurar la legibilidad y el uso confortable del sistema, lo cual permite al usuario alcanzar utilidad en la tarea que está realizando y para lo cual crea entradas al sistema a través de diferentes habilidades corporales como control por la mano, por el pie, por la voz o por los ojos. Así mismo, no se debe saturar el elemento de visualización con ruido o información innecesaria, por lo que se debe mantener simplicidad en el diseño sin sacrificar utilidad (INEN, 2014; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1997).

En el mercado local existen diversos elementos de visualización como pantallas LCD, pantallas OLED, pantallas TFT, entre otras. Sin embargo, se considera las que permiten implementar una interfaz de usuario con el objetivo de brindar mayor ergonomía, principalmente en el aspecto de la legibilidad de los datos que se tiene previsto mostrar. La Tabla 10 resume algunas características importantes a considerar para la selección de la pantalla, y para lo cual se toma en cuenta dos posibles alternativas: Raspberry Pi Display y Nextion NX8048P070-011R-Y.

Tabla 10.
Comparación entre pantallas

CARACTERÍSTICA	RASPBERRY PI DISPLAY	NEXTION NX8048P070-011R-Y
Tamaño	7 in	7in
Resolución	800x480	800x480
Touch	Si	Si
Comunicación	DSI	TTL serial
Disponibilidad en el mercado	Media	Baja

Fuente: (Farnell & Newark, 2019)

La Tabla 10 muestra que las pantallas Raspberry Pi y Nextion tienen características similares en cuanto al tamaño y la resolución, sin embargo, la disponibilidad en el mercado favorece al Display de Raspberry. Por otro lado, la comunicación de la pantalla Nextion requiere de puertos seriales Rx y Tx, mismos que se encuentran ocupados en la placa Arduino Mega 2560 por los elementos externos. La implementación de la pantalla Raspberry Pi 7" conlleva a la utilización de una placa adicional Raspberry Pi, lo cual puede resultar favorable ya que no se satura los puertos y capacidad de operación de la placa Arduino Mega. Por lo tanto, la pantalla Raspberry Pi 7" Display se selecciona como alternativa de solución, al igual que la placa Raspberry Pi 3 Model B+, por ser la de mayor disponibilidad en el mercado local.

3.3.6 Diseño electrónico

Partiendo de la selección de elementos realizada, el prototipo debe contar con diferentes dispositivos electrónicos para su funcionamiento, mismos que se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11.
Elementos electrónicos seleccionados

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN SELECCIONADA	
Sensor de distancia	TOF10120
Sensor de masa	Celda de carga + HX711
Sistema embebido	Arduino Mega 2560 + Raspberry Pi 3 Model B+
Elemento de visualización	Raspberry Pi Display 7"

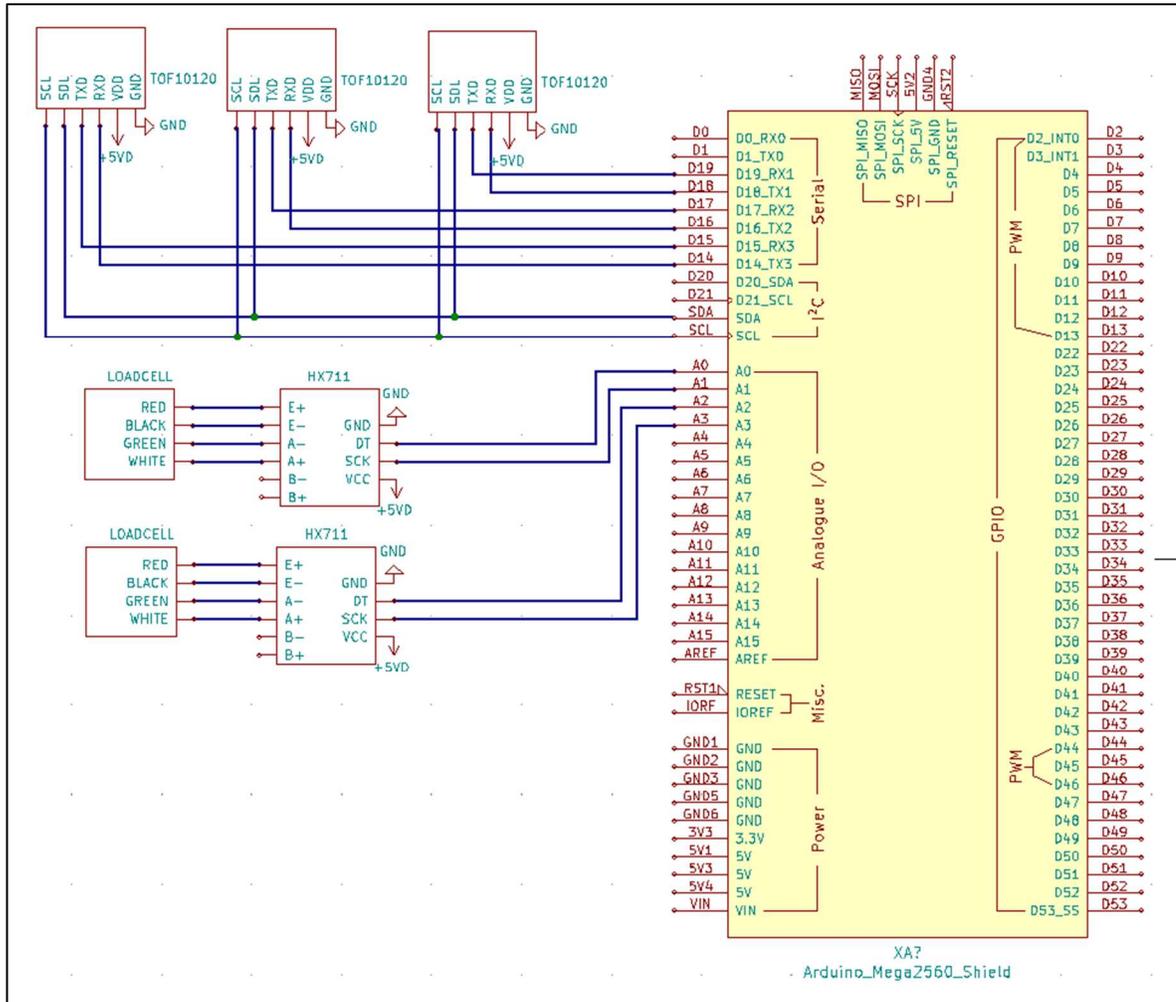
Fuente: autor

Para el cálculo del volumen del listón de madera de balsa se requiere de tres mediciones: alto, largo y ancho, por lo que debe haber tres sensores de distancia ubicados perpendicularmente entre sí. Por otro lado, la masa del listón puede ser medida con un solo sensor de peso, sin embargo, debido a que el sensor representa un punto de apoyo para el área de medición, se implementará dos sensores de tal forma que haya dos puntos de apoyo.

Las lecturas de los sensores de distancia y de peso serán enviadas a la placa Arduino Mega 2560, la cual transmitirá dicha información a la placa Raspberry Pi 3 para ser presentadas en la pantalla mediante la interfaz de usuario.

El diagrama esquemático para el módulo de adquisición de datos se muestra en la Figura 11.

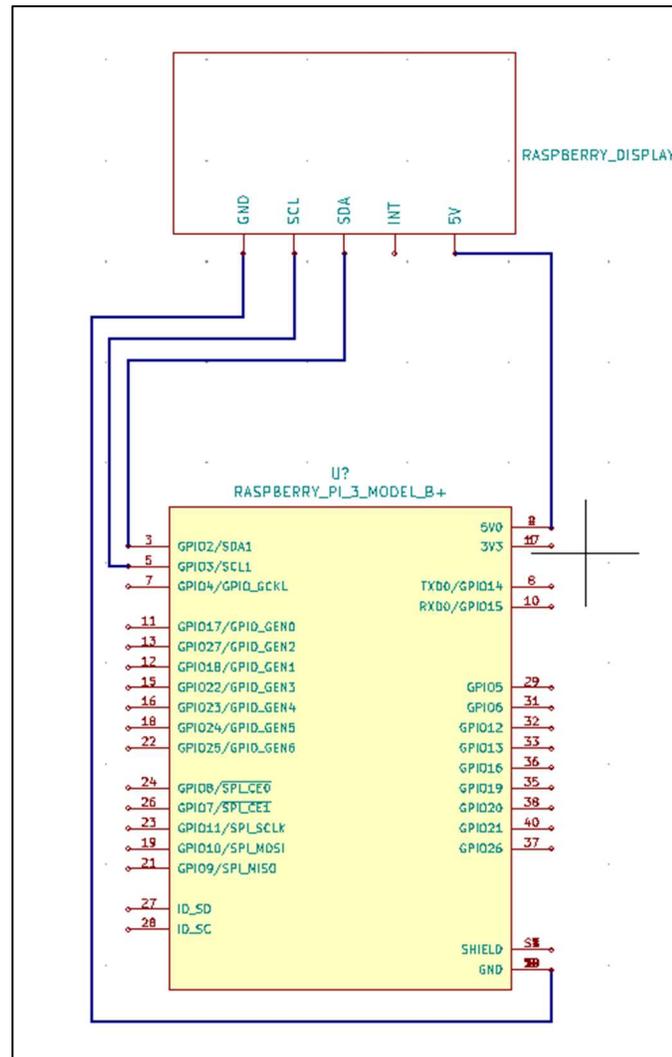
Figura 11.
Esquemático módulo de adquisición de datos



Fuente: autor

La Figura 12 muestra el diagrama esquemático para la conexión entre la placa Raspberry Pi 3 Model B+ y la Raspberry Pi Display 7”.

Figura 12.
Esquemático Raspberry pi 3 y Display



Fuente: autor

La transmisión de datos entre la placa Arduino Mega 2560 y la placa Raspberry Pi 3 Model B+ se realiza mediante los puertos de comunicación USB.

Alimentación.

La alimentación del dispositivo se centra en proveer de energía a los diferentes sistemas embebidos como placas y sensores.

Los sensores requieren de una alimentación de 5 VDC, por lo que la placa Arduino Mega puede proveer de esta tensión mediante su pin de salida de 5V. Por otro lado, la conexión entre las tarjetas Arduino Mega y Raspberry Pi se realiza mediante cable USB, el cual permite tanto la comunicación como la alimentación, en este caso, del módulo de adquisición de datos.

Por lo tanto, la alimentación se centrará en la placa Raspberry Pi, la cual proveerá de la tensión necesaria para el funcionamiento de la placa Arduino Mega, junto a los sensores. Considerando el Datasheet de la Raspberry Pi 3 Model B+, requiere de una potencia de entrada de 5VDC a 2,5 A mediante un conector micro USB.

Cables de conexión.

Los cables de conexión para el dispositivo deben ser un medio para el enlace entre los sensores y la placa Arduino Mega 2560.

Considerando que los sensores de distancia, de acuerdo con el esquemático de la Figura 11, requieren de un total de 6 cables, se considera el uso de cable UTP de 4 hilos, puesto que cada hilo puede ser el medio de conexión necesario y, además, no presenta rigidez en comparación con cables de par trenzado de 8 hilos, por lo que dobleces cerca de los 90 grados no afectarían la integridad de cada hilo.

3.3.7 Diseño de la estructura.

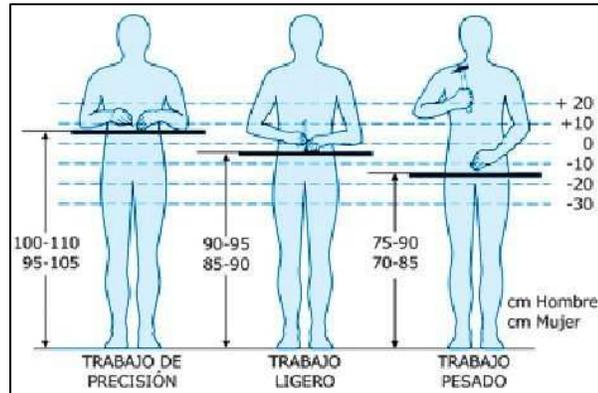
Para el diseño de la estructura se considera el material estructural seleccionado. En el mercado local, uno de los principales proveedores de este material es la empresa Dipac S.A, misma que ofrece diferentes presentaciones como barras, tubos rectangulares, tubos cuadrados, tubos circulares, entre otros.

Con base a una de las presentaciones de tubos cuadrados de acero ASTM A513 se realiza un diseño preliminar de la estructura considerando las dimensiones máximas del área de medición dadas en la Tabla 3. Así mismo, se toma en consideración la posible ubicación de los sensores y del resto de componentes electrónicos a implementarse.

Para la altura del área de trabajo se toma en cuenta el rango de dimensiones dada por la Norma INEN 1641: Muebles de oficina. Escritorios y mesas. Requisitos. En la que se menciona que la altura de la superficie de trabajo para la categoría Sentado hasta de pie debe tener un rango mínimo de 650 a 1250 para mesas y escritorios tipo A (altura regulable), mientras que para elementos de tipo C (altura fija) no hay un rango de medidas establecido (INEN, 2016). Por otro lado, el Reglamento interno de Seguridad y Salud en el Trabajo de la Universidad de las Américas establece que las mesas de trabajo deben ubicarse a la altura de los codos, si el operario necesita mayor precisión en el trabajo que va a realizar entonces puede aumentarse la altura de la mesa, mientras que, si el trabajo exige esfuerzos físicos importantes, el plano deberá bajarse (Universidad De las Américas, 2017).

La Figura 13 muestra un ejemplo de los diferentes tipos de esfuerzo requeridos para la realización de un trabajo y su relación con la altura de la superficie de ejecución.

Figura 13.
Trabajo y altura de superficie



Fuente: <https://n9.cl/5peji0>

Se desarrolla el proceso de diseño de la estructura considerando las ideas mencionadas previamente, así como los parámetros definidos. La Figura 14 muestra el diseño estructural propuesto considerando un tubo cuadrado de 30 mm de lado y 2 mm de espesor de pared, disponible en el catálogo de Dipac S.A.

Figura 14.
Diseño estructural propuesto



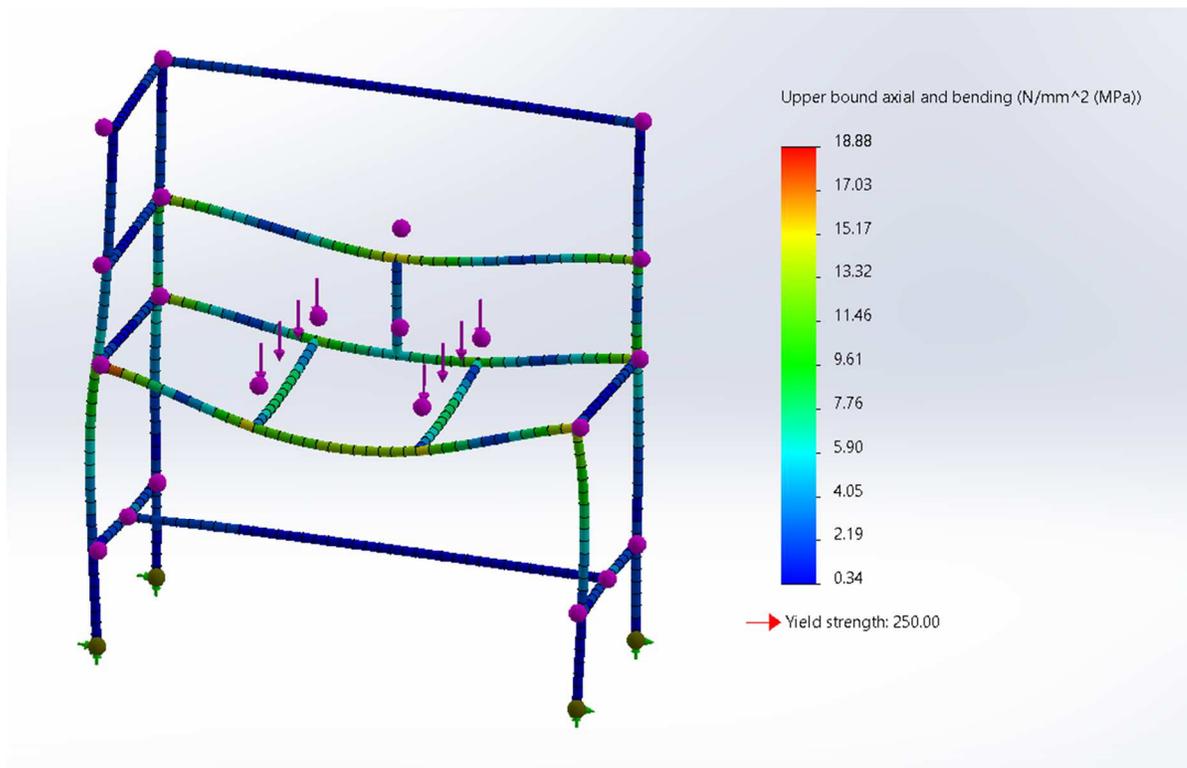
Fuente: autor

Se procede con la evaluación del diseño estructural propuesto con ayuda de una herramienta de análisis de elementos finitos. Las condiciones de carga se definen por las condiciones de trabajo a las que estará sometido el dispositivo, en este caso se considera la mayor carga de trabajo que se presenta cuando el listón a medir tiene las dimensiones más grandes que, con base a la Tabla 3, son 130x30x30 cm, presentándose así el mayor volumen disponible. Por otro lado, a volumen constante, la masa aumenta al incrementarse la densidad, por lo que se considera la mayor densidad de acuerdo con las clases internacionales para el caso de madera de balsa con humedad del 12%, es decir 220 kg/m³.

Bajo las condiciones antes descritas, la mayor carga de trabajo a la que estará sometido el dispositivo es de 25,74 kgf, equivalente a 252,42 N.

Implementando el análisis de elementos finitos es posible simular el comportamiento de la estructura bajo las condiciones de carga, permitiendo conocer los valores de esfuerzo, tal como muestra la Figura 15.

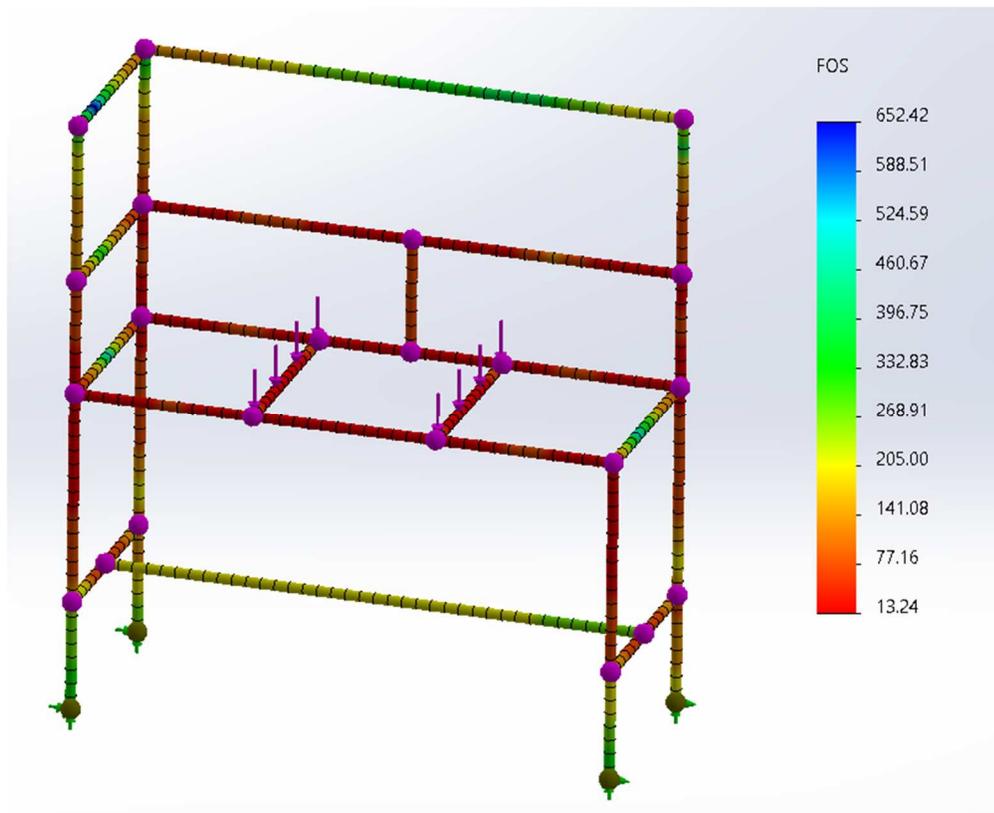
Figura 15.
Esfuerzos en la estructura a condiciones normales de carga



Fuente: autor

Así mismo, es posible desplegar la gráfica que represente el factor de seguridad (FDS) de la estructura. La Figura 16 permite visualizar el FDS mínimo de 13,24; el cual es un indicador de que los elementos no fallarán bajo las condiciones de carga establecidas.

Figura 16.
Factor de seguridad a condiciones normales de carga



Fuente: autor

A pesar de que la Figura 15 muestra una magnitud de esfuerzo máxima de 18.88 MPa y la Figura 16 un FDS mínimo de 13,24; la masiva cantidad de listones de madera de balsa que deben ser medidos obliga al operador a estar expuesto múltiples horas frente al dispositivo, generando la tendencia de la persona a recargarse sobre la estructura y, por lo tanto, a incrementar la carga de trabajo a la que estará sometido el dispositivo. Por tal razón se reevalúa la simulación y se considera un factor de sobrecarga a un aproximado de 80 kgf, valor que se distribuye en la parte central de la estructura (163,265 kgf/m equivalente a 1601,63 N/m), siendo la viga mostrada en la Figura 17 el elemento estructural principalmente afectado por dicha carga.

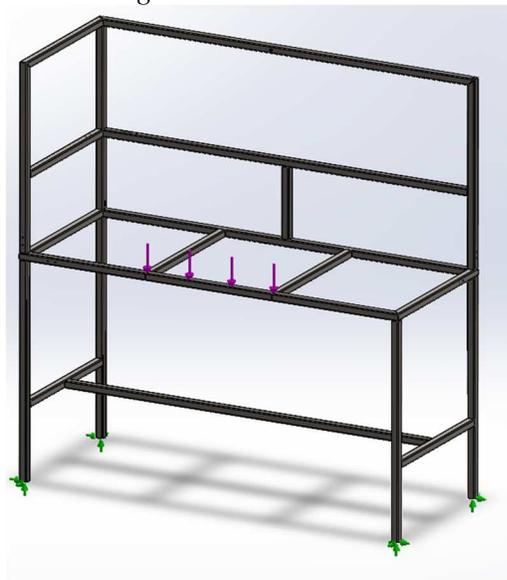
Figura 17.
Elemento estructural más afectado



Fuente: autor

Se construye el modelo para realizar análisis de elementos finitos considerando la carga de 1601,63 N/m aplicado en la zona central de la viga, tal como se muestra en la Figura 18.

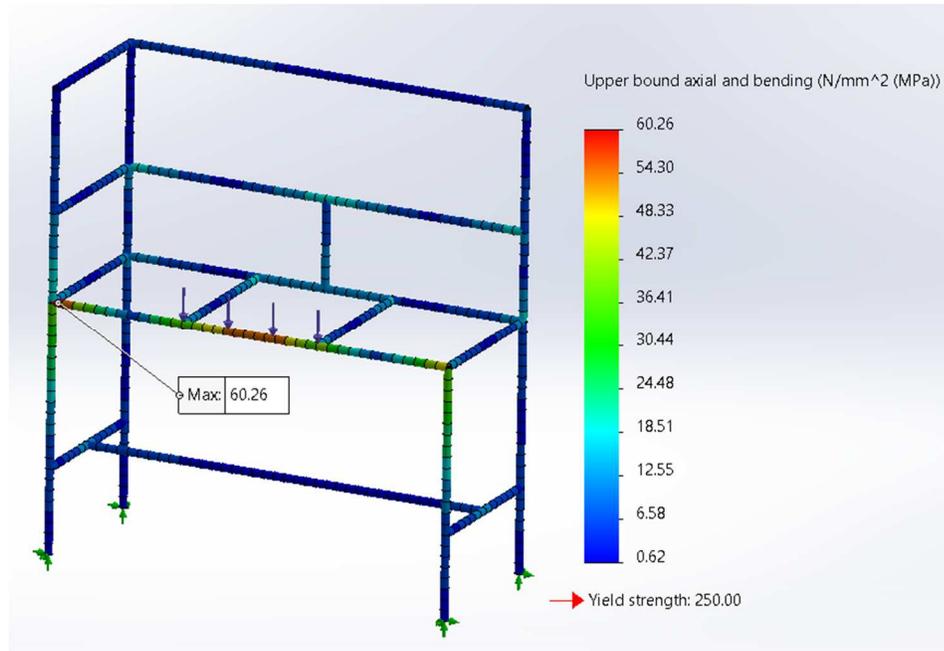
Figura 18.
Modelo virtual para análisis de carga



Fuente: autor

La Figura 19 permite visualizar el resultado de dicha simulación, donde se aprecia un esfuerzo máximo de 60,26 MPa.

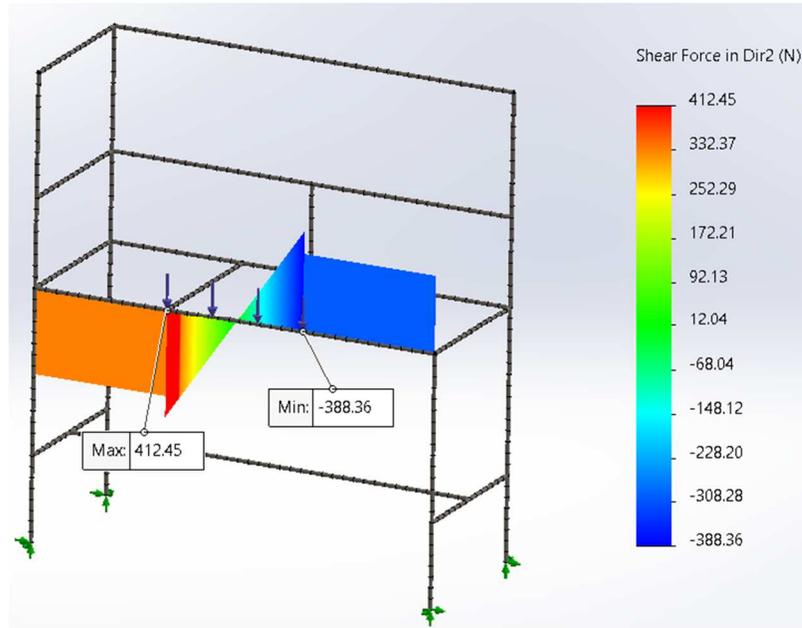
Figura 19.
Esfuerzos en estructura



Fuente: autor

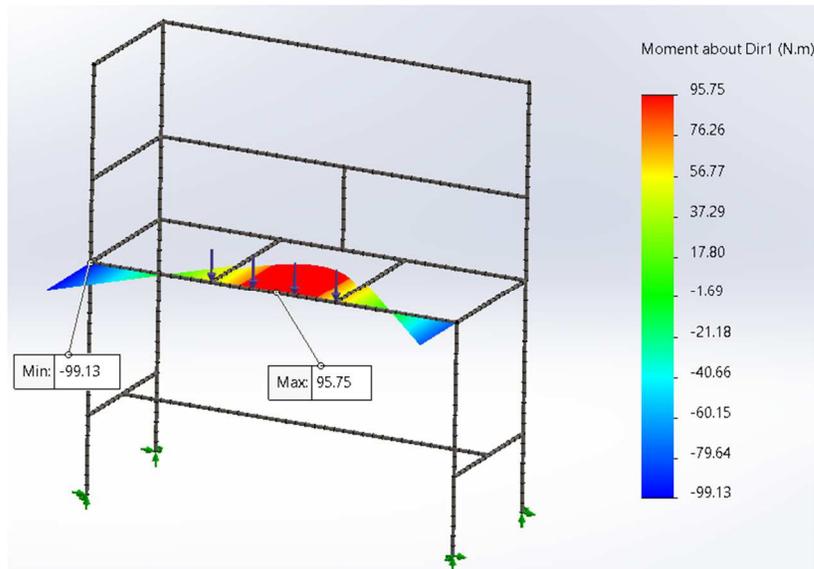
Así mismo, se despliega los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la viga central afectada, como se muestra en las Figuras 20 y 21, respectivamente.

Figura 20.
Diagrama de fuerza cortante



Fuente: autor

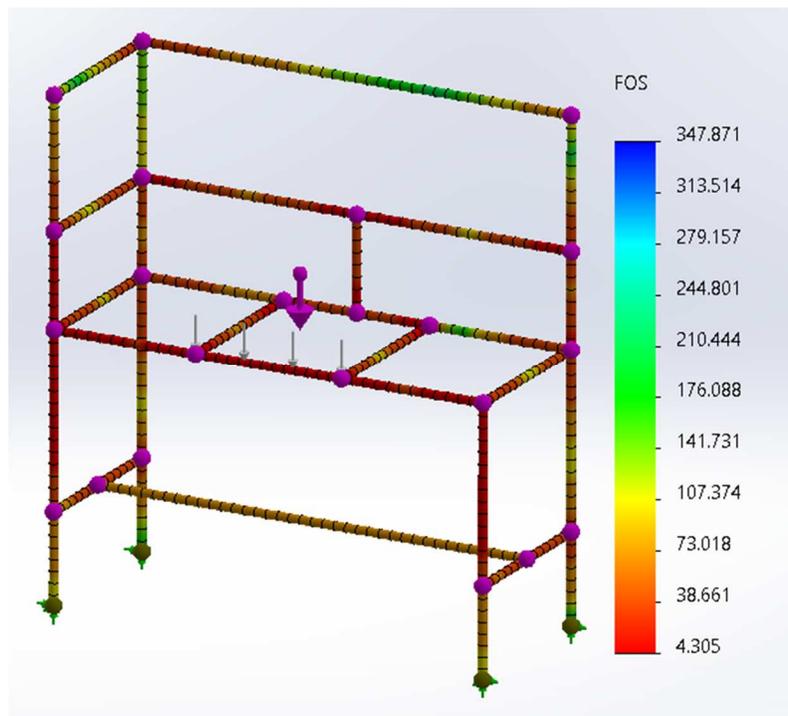
Figura 21.
Diagrama de momento flector



Fuente: autor

Con base al diagrama de momento flector de la Figura 21, se determina el momento flector máximo con un valor de -99,13 N-m. Por otro lado, la Figura 22 permite conocer el factor de seguridad de la estructura, siendo el mínimo de 4,305.

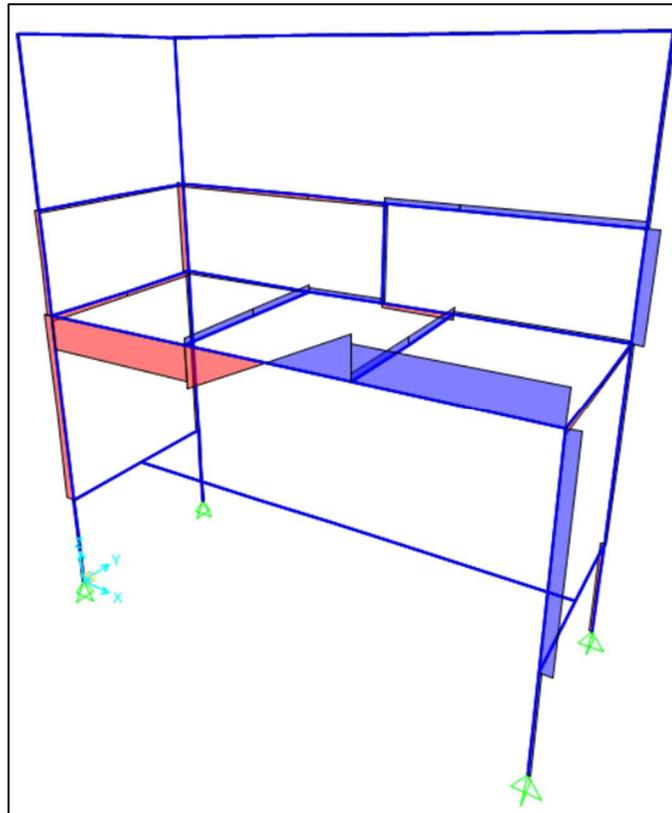
Figura 22.
Factor de seguridad de la estructura



Fuente: autor

Con el objetivo de validar la simulación antes presentada, se emplea un software diferente para el estudio de los diagramas de fuerza cortante y momento flector, considerando el mismo modelo del análisis anterior. La Figura 23 permite visualizar el diagrama de fuerza cortante de la estructura.

Figura 23.
Diagrama alterno de fuerza cortante



Fuente: autor

Con base al modelo de la Figura 23, se despliega el máximo valor de la fuerza cortante presentada en la viga frontal de la estructura, tal como se observa en la Figura 24.

Figura 24.
Fuerza cortante máxima

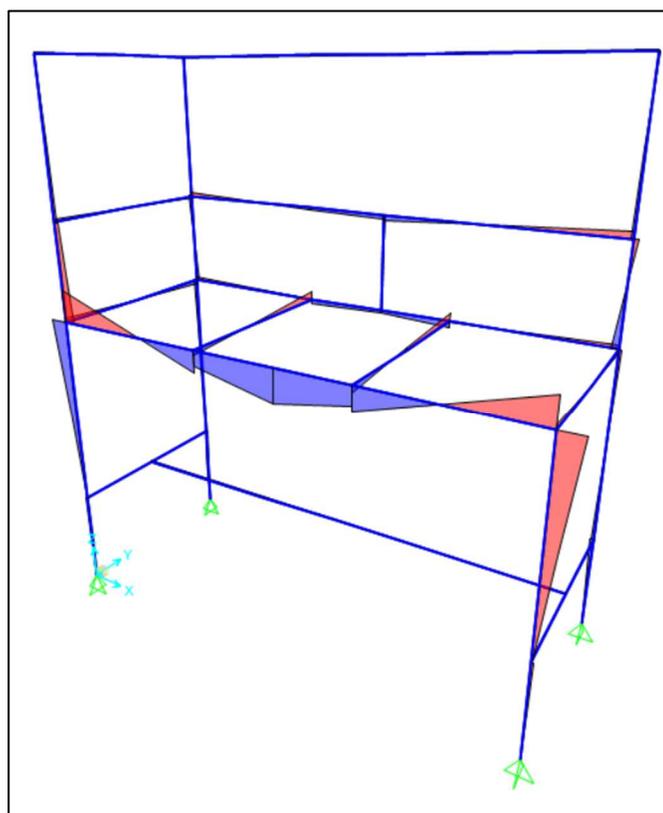


Fuente: autor

La Figura 24 permite conocer la fuerza cortante máxima con un valor de $-404,61$ N. Así mismo, la Figura 20 muestra el resultado de este parámetro con un valor máximo de $412,45$ N. Por sistema de coordenadas que maneja cada software de manera independiente se considera únicamente el valor absoluto de dichos valores y al calcular el error porcentual entre estos, se determina un error de $1,90\%$.

De igual forma, se muestra el diagrama de momento flector mediante la Figura 25.

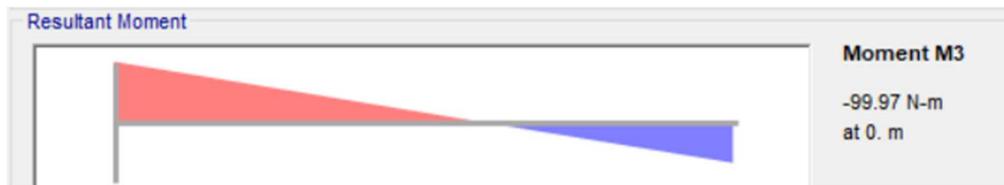
Figura 25.
Diagrama alterno de momento flector



Fuente: autor

El valor máximo de momento flector presentado en la viga frontal de la estructura se visualiza en la Figura 26.

Figura 26.
Momento flector máximo



Fuente: autor

El momento flector máximo, de acuerdo con la Figura 26, es de -99,97 N-m. Por otro lado, la Figura 21 establece el resultado de este parámetro en 95,75 N-m. Se considera el valor absoluto de cada uno de estos datos para ignorar la convención establecida por los sistemas de coordenadas de las herramientas digitales y se calcula el error porcentual, el cual es de 4,22%.

Los resultados presentados en los diagramas de fuerza cortante y momento flector de cada software de simulación empleado permiten determinar la validez de cada uno, puesto que el error porcentual obtenido se mantiene por debajo del 5% en ambos casos.

Las simulaciones previas presentadas se han realizado con un modelo que considera únicamente la carga de trabajo, ignorando el peso propio de la estructura, por esta razón se construye un nuevo modelo de simulación que tome en cuenta la carga viva y muerta, manteniendo los parámetros empleados en las simulaciones previas que garantizan la validez de los resultados.

El código de la Norma Ecuatoriana de la Construcción para cargas no sísmicas (NEC – SE – CG) establece una serie de combinaciones de carga para validar la resistencia de una estructura (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014). Con base a dicha norma se establece nuevos casos de estudio, tal como se detalla a continuación:

- Combinación 1: 1,4 D
- Combinación 2: 1,2 D + 1,6 L

Donde:

D = Carga muerta

L = Carga viva

Los resultados de la simulación para las combinaciones 1 y 2 se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12.

Resultados para combinaciones de carga

	ESFUERZO (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD	DESPLAZAMIENTO (mm)
Combinación 1	3,55	70,46	0,124
Combinación 2	95,55	2,62	4,240

Fuente: autor

La combinación de carga más crítica es la 2, en donde se incrementa un 20% a la carga muerta y un 60% a la carga viva. Bajo estas condiciones, el factor de seguridad mínimo presentado es de 2,62; el cual representa un valor aceptable para calificar la resistencia mecánica de la estructura.

Con el análisis de elementos finitos es posible validar el diseño de la estructura y los resultados de las simulaciones muestran que la estructura soporta las condiciones de carga y sobrecarga, por lo que se considera dicha estructura como base para la implementación del dispositivo. A partir de ello se continúa con el proceso de diseño para la ubicación de cubiertas en

la estructura, especialmente para el área de medición. La Figura 27 muestra el diseño de la estructura del dispositivo una vez se han integrado las cubiertas estructurales.

Figura 27.
Estructura con cubiertas



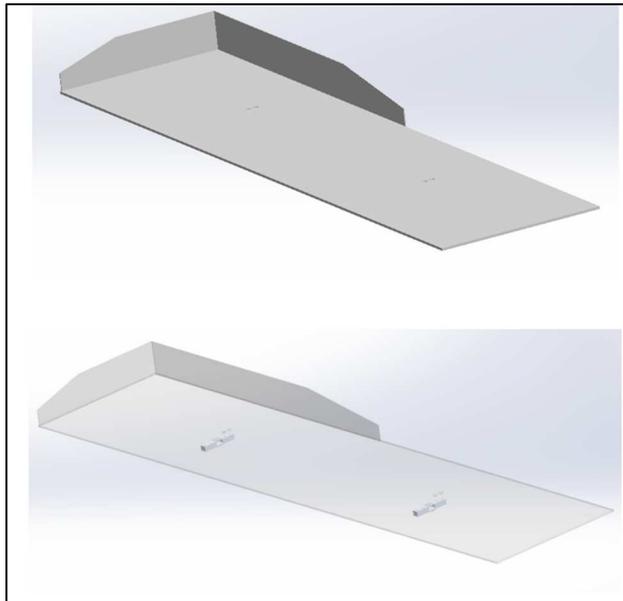
Fuente: autor

El diseño de la estructura con las cubiertas mostrado en la Figura 27 busca salvaguardar el área de medición de la parte lateral izquierda y de la parte posterior, con el objetivo de evitar posibles daños en caso de golpes con otros objetos.

3.3.8 Acople para sensores de peso

Se plante el diseño de una plataforma de pesado, la cual cuenta con límite en la parte posterior e izquierda con el objetivo de servir de pivote para los sensores de ancho y largo, tal como muestra la Figura 28. Esta plataforma de pesado permitirá, a su vez, acoplar los sensores de peso en la parte inferior de la misma y anclarlos mediante el uso de pernos.

Figura 28.
Plataforma de pesado



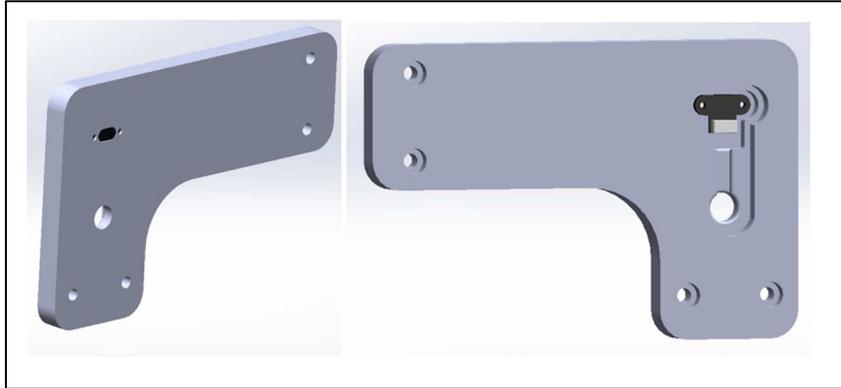
Fuente: autor

El material seleccionado para la plataforma de pesado es acrílico de 5 mm de espesor para la plataforma base, y para los laterales acrílico de 2 mm de espesor. Esto debido a la rigidez del acrílico que evitaría que la plataforma se pandee al contar únicamente con dos puntos de apoyo. Por otro lado, los listones de madera de balsa no llegan a representar grandes cargas para causar pandeo o deflexión en materiales como el acrílico.

3.3.9 Carcasa para sensor de ancho

El sensor de ancho corresponde al sensor de distancia TOF10120, por lo que se realiza un modelo virtual en 3D de este sensor para realizar el proceso de diseño del acople. La Figura 29 muestra el diseño propuesto, el cual cuenta con perforaciones para la sujeción de esta pieza a la estructura mediante pernos. Así mismo, la cavidad permite la inserción del sensor y la ubicación de sus cables de conexión que podrán ubicarse fuera del acople mediante la abertura central.

Figura 29.
Acople sensor de ancho

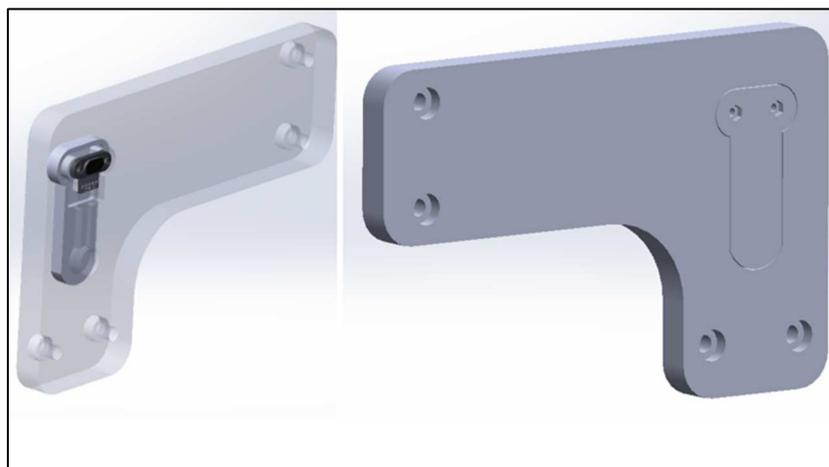


Fuente: autor.

Adicionalmente, se realiza el diseño de una pieza de sujeción para el sensor, la cual se acopla a la cavidad y presiona la parte posterior del sensor para que este se mantenga en una posición fija.

La Figura 30 muestra el ensamble completo del acople para el sensor de ancho.

Figura 30.
Ensamble sensor ancho



Fuente: autor

El acople para el sensor de ancho se ha diseñado con el objetivo de ser fabricado mediante manufactura aditiva, empleando filamento PETG. Esta pieza no tiene por objetivo soportar cargas externas, ya que su única función es la de aislar de la intemperie al sensor.

3.3.10 Carcasa para sensor de alto

El diseño para el acople del sensor de alto se realiza de manera similar al mencionado para el sensor de ancho, empleando el mismo material para su impresión en 3D y variando únicamente en sus dimensiones, tal como muestra la Figura 31.

Figura 31.
Acople sensor alto



Fuente: autor.

3.3.11 Carcasa para sensor de largo

El acople para el sensor de largo se ha diseñado de manera similar a los acoples de los otros sensores, para el cual también se consideró el uso de PETG como material base. La Figura 33 muestra el diseño propuesto.

Figura 32.
Acople sensor largo



Fuente: autor

3.3.12 Soporte flexible de anclaje a estructura

De acuerdo con la Tabla 5, uno de los parámetros de diseño es la implementación de una pantalla con posición ajustable. Por lo que el diseño del acople de la pantalla deberá anclarse a otro equipo que permita variar el posicionamiento de este. Tomando en cuenta la metodología DFMA, el empleo de elementos estandarizados permite disminuir errores durante los procesos de ensamblaje de un dispositivo. Por lo tanto, se busca en el mercado local alternativas de solución en cuanto a soportes flexibles, siendo los soportes de teléfono para montaje en motocicletas los más adecuados debido a la rigidez que pueden presentar una vez se ha colocado en la posición deseada. La Figura 33 muestra el soporte flexible seleccionado como alternativa de solución.

Figura 33.
Soporte flexible



Fuente: <https://n9.cl/diwoi>

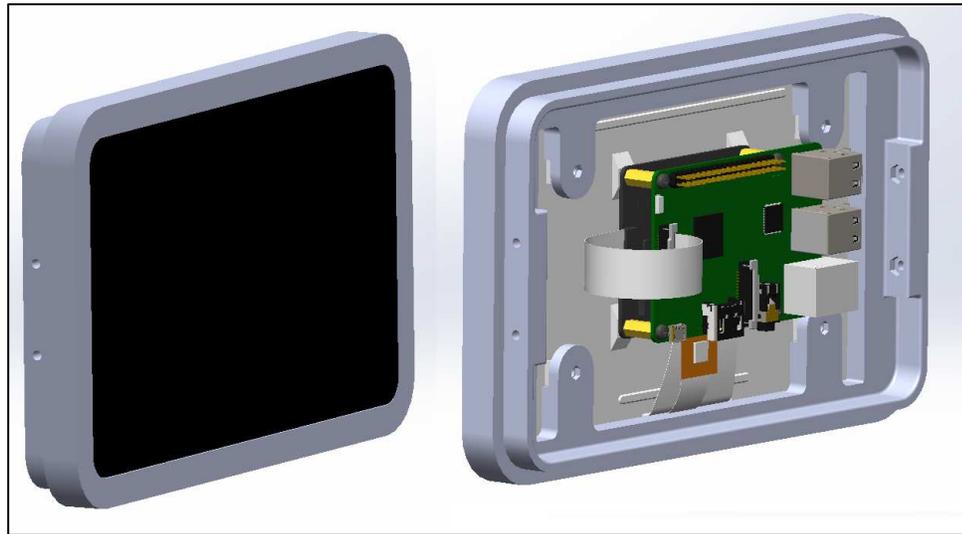
3.3.13 Carcasa para pantalla y sistemas embebidos

Para el diseño del acople de la pantalla se considera los siguientes aspectos:

- Fabricación mediante manufactura aditiva
- Soporte flexible de anclaje a estructura
- La pantalla y la placa Raspberry Pi 3 Model B+ forman un ensamble
- La placa Arduino Mega 2560 se colocará dentro de este modelo junto a los módulos HX711

Tomando en cuenta los aspectos antes mencionados se realiza el proceso de diseño del acople para la pantalla, para lo cual se emplea modelos 3D de los elementos que se ubicarán dentro de este. La Figura 34 muestra el diseño propuesto de acople para la pantalla.

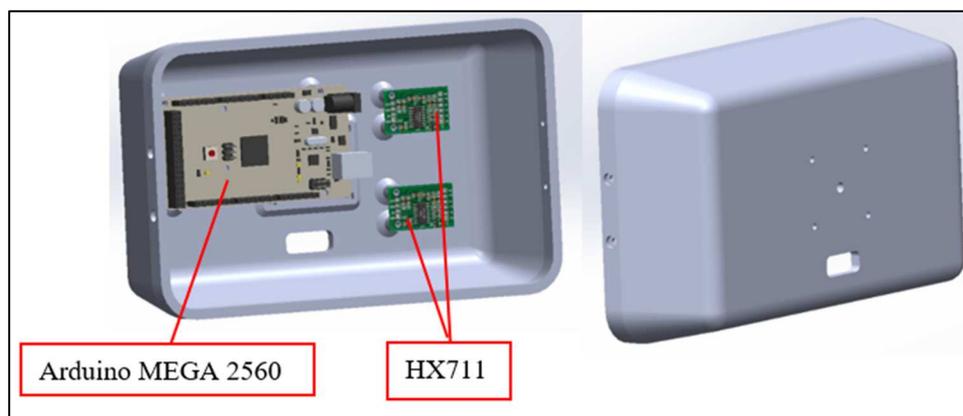
Figura 34.
Acople para pantalla



Fuente: autor

Por otro lado, se plantea el diseño de la carcasa para la pantalla y los demás elementos a implementarse. La Figura 35 permite visualizar el diseño propuesto y la ubicación del Arduino Mega 2560 junto a los integrados HX711.

Figura 35.
Carcasa para pantalla y placas



Fuente: autor

El acople para la pantalla y la carcasa forman un subensamblaje que se puede apreciar en la Figura 36, misma que muestra la ubicación de los dispositivos dentro de la carcasa.

Figura 36.
Ensamble de carcasa para placas y pantalla

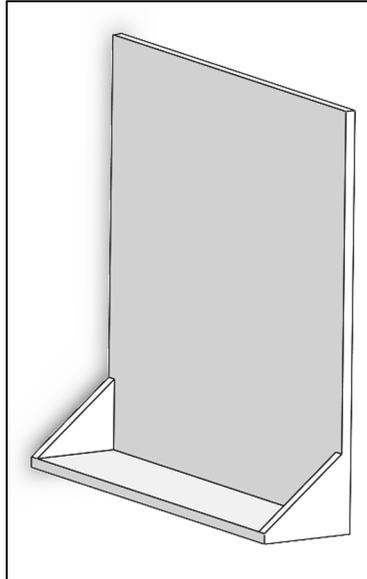


Fuente: autor

3.3.14 Diseño de pieza limitante

Los sensores de largo y ancho son los que miden distancias mayores hasta llegar al objetivo, lo que representa un incremento en el error de lectura. Con el objetivo de mejorar las lecturas de los sensores de distancia de largo y ancho, se plantea el uso de un accesorio complementario para el dispositivo, el cual consiste en una pieza limitante que, de acuerdo con el datasheet del sensor TOF10120, la reflectancia es mejor en fondos de color blanco, lo que aumenta la precisión del sensor. La Figura 37 presenta el diseño de la pieza limitante en donde es requisito que sea de color blanco. Su aplicación correcta en el dispositivo se presenta en el Anexo 1, Sección II: Adquisición de datos.

Figura 37.
Pieza limitante



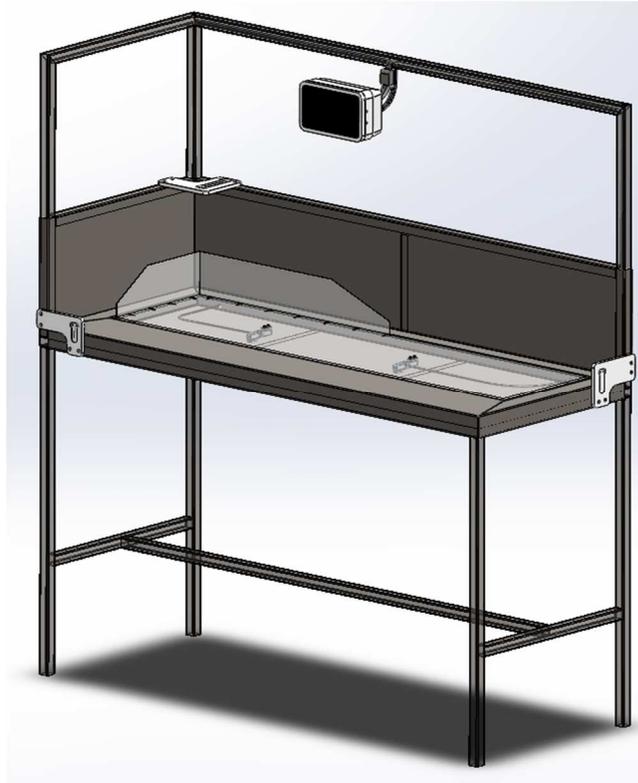
Fuente: autor

3.4 Resultados Cuarta Etapa: Implementación

Se realiza la construcción y ensamblaje del dispositivo tomando en cuenta cada una de las partes diseñadas y seleccionadas, con base a los parámetros de diseño establecidos por la matriz QFD. La Figura 38 permite visualizar el dispositivo ensamblado completamente en un modelo virtual. Los planos de conjunto y parte se encuentran disponibles en el Anexo 5 del presente documento donde se detallan las dimensiones de cada pieza.

Figura 38.

Modelo 3D de dispositivo ensamblado



Fuente: autor

Se realiza la implementación del dispositivo bajo los procesos de fabricación considerados durante la etapa de diseño. El resultado se puede apreciar en la Figura 39.

Figura 39.
Dispositivo implementado



Fuente: autor

Así mismo, se realiza el desarrollo de los algoritmos de control para el dispositivo. Para ello se identifica dos componentes: interfaz gráfica de usuario y módulo de adquisición de datos.

3.4.1 Diseño de interfaz gráfica de usuario

Con base a la norma NTE INEN-ISO 9241-400 y el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Los dispositivos con pantalla de visualización deben priorizar la legibilidad de los datos presentados, así como mantener su simplicidad sin sacrificar la funcionalidad de este. Es por ello por lo que se ha planteado el desarrollo de una interfaz de usuario que permita interactuar al operario con el dispositivo de manera óptima.

El Anexo 2 del presente documento permite visualizar el diagrama de flujo de la interfaz de usuario, donde se detalla la lógica de programación establecida. Así mismo, el Anexo 1 respecto al manual de usuario presenta con más detalle el funcionamiento de la interfaz de usuario, junto a los posibles fallos que pudieran presentarse en el dispositivo.

La interfaz de usuario comienza con una pantalla de bienvenida donde a su vez muestra el estado actual del dispositivo, es decir, si en caso de que la conexión entre la placa Raspberry Pi 3 Model B+ y el Arduino Mega 2560 haya caído por motivos no conocidos, entonces la pantalla mostrará el mensaje “Error de conexión”, tal como se muestra en la Figura 40.

Figura 40.
Pantalla error de conexión



Fuente: autor

Por otro lado, si la conexión entre la Raspberry Pi 3 y la placa Arduino se efectúa correctamente, entonces se muestra el mensaje “Conectado” y da la posibilidad de continuar con el normal funcionamiento del programa, mostrando el botón para continuar tal como se aprecia en la Figura 41.

Figura 41.
Pantalla estado conectado



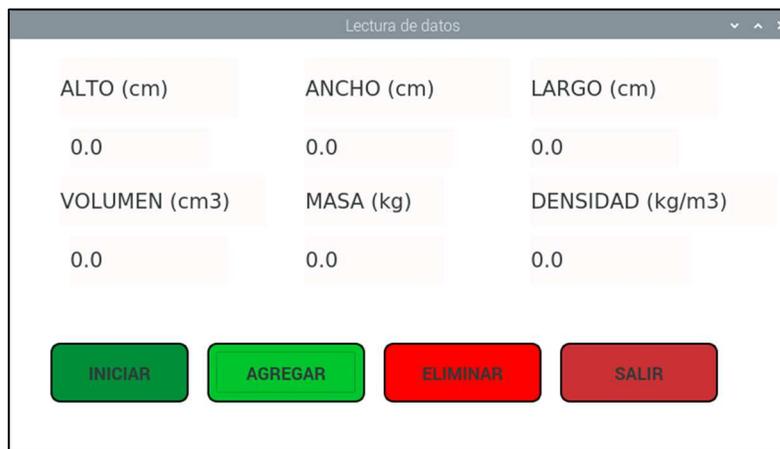
Fuente: autor

Independientemente de si se presenta o no el Error de conexión, la pantalla tendrá dos opciones disponibles para el usuario. El botón Archivo de Datos permite abrir y visualizar el registro de todos los datos que han sido añadidos a la memoria del dispositivo. Por otro lado, el botón Apagar finaliza la ejecución del programa y apaga el dispositivo de forma segura.

Al presionar el botón de Calcular Densidad, aparecerá una segunda pantalla (Figura 42) con las diferentes variables que se tiene por objetivo conocer, de acuerdo con información dada por la empresa auspiciante, donde es necesario observar el largo, alto, ancho, volumen, masa y densidad del listón que se esté midiendo.

Figura 42.

Pantalla lectura de datos



Fuente: autor

La pantalla lectura de datos mostrada en la Figura 42 cuenta con cuatro botones los cuales permiten realizar las funciones listadas a continuación:

- **INICIAR:** empieza el proceso de medición para obtener las lecturas necesarias (largo, alto, ancho y masa) y se calculará las variables derivadas (volumen y densidad). La información obtenida se mostrará en la variable correspondiente en la unidad establecida.
- **AGREGAR:** agrega los valores actuales mostrados en pantalla a un archivo CSV para su posterior lectura.
- **ELIMINAR:** se elimina todos los valores mostrados en pantalla.
- **SALIR:** termina la ejecución de la aplicación y la cierra.

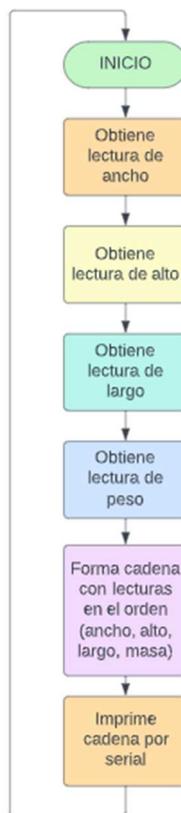
El dispositivo cuenta con una calibración por software para los sensores, por lo que no requiere procesos externos de calibración una vez se ha realizado su configuración previa. Además,

el dispositivo no cuenta con pulsadores externos como paro de emergencia u otros, ya que no cuenta con partes móviles que puedan poner en riesgo la seguridad de los operarios.

3.4.2 Módulo de adquisición de datos

El módulo de adquisición de datos está conformado por la placa Arduino Mega 2560 (placa controladora), junto a los sensores de distancia y peso. La programación de este módulo se basa en la codificación de un algoritmo de control que será compilado y subido a la placa controladora. La Figura 43 muestra el diagrama de flujo para el funcionamiento del módulo de adquisición de datos.

Figura 43.
Diagrama de flujo módulo de adquisición de datos



Fuente: autor

El diagrama de flujo presentado en la Figura 43 permite visualizar el funcionamiento del módulo de adquisición de datos donde la placa controladora se encarga de obtener las lecturas de cada uno de los sensores. Posteriormente, se crea una variable de tipo *string* con el objetivo de almacenar todos los datos, los cuales se ordenan y se separan mediante el carácter punto y coma (;), obteniendo una cadena con el contenido: ancho; alto; largo; masa. Finalmente, la cadena se imprime en el serial, dato que es capturado por la placa Raspberry para ser procesado.

3.4.3 Costo de producción

El costo de producción se determina tomando en cuenta todos los elementos estandarizados y de fabricación que conforman el dispositivo.

La Tabla 13 muestra los componentes del dispositivo y su costo unitario, junto al costo total del proyecto.

Tabla 13.
Costos de producción

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Raspberry Pi 3 Model B+ con Display 7"	1 u	\$ 160,00	\$ 160,00
Arduino Mega 2560	1 u	\$ 24,00	\$ 24,00
Sensor TOF10120	3 u	\$ 21,00	\$ 63,00
Sensor de peso 20kg con módulo HX711	2 u	\$ 8,00	\$ 16,00
Plancha de acrílico 1326x326 mm	1 u	\$ 55,00	\$ 55,00
Plancha de acrílico 650x120 mm	1 u	\$ 24,00	\$ 24,00
Plancha de acrílico 325x120	1 u	\$ 16,00	\$ 16,00
Estructura metálica con cubiertas	1 u	\$ 265,00	\$ 265,00
Cables de conexión	10 m	\$ 0,40	\$ 4,00
Acople de sensor de alto	1 u	\$ 13,50	\$ 13,50
Acople de sensor de ancho	1 u	\$ 10,50	\$ 10,50
Acople de sensor de largo	1 u	\$ 10,50	\$ 10,50
Tapas de acoples	3 u	\$ 4,00	\$ 12,00
Acople de pantalla	1 u	\$ 12,00	\$ 12,00
Carcasa de embebidos	1 u	\$ 22,50	\$ 22,50
Elementos de sujeción	22 u	\$ 0,15	\$ 3,30
Total:			\$ 711,30

Fuente: autor

3.5 Resultados Quinta etapa: Pruebas de funcionamiento

En esta sección se realiza las pruebas de funcionamiento del sistema de medición, para ello se cuenta con diferentes listones de madera de balsa proporcionados por la empresa auspiciante mostrados en la Figura 44.

Figura 44.

Listones de madera de balsa



Fuente: autor

Se realiza el proceso de medición de cada uno de los listones de madera de balsa, para ello se inicia el dispositivo mediante la interfaz de usuario y se procede a colocar cada uno de los listones por separado, tal como muestra la Figura 45. Se sigue los pasos descritos en el Anexo I – Sección II: Adquisición de datos, para un correcto uso del dispositivo.

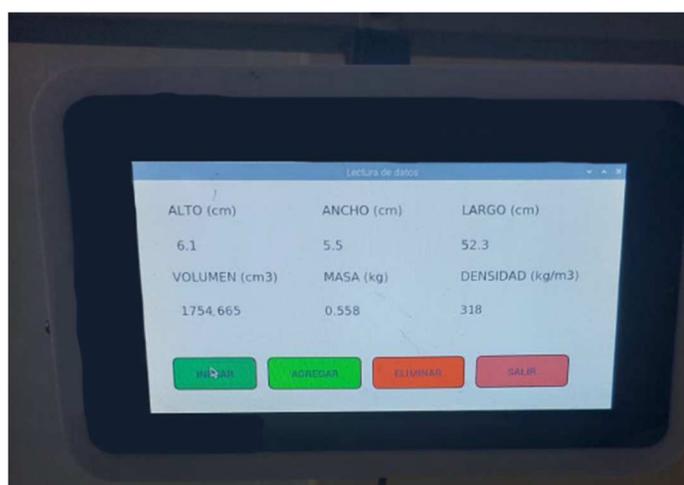
Figura 45.
Medición de un listón de madera de balsa



Fuente: autor

El resultado obtenido por el sistema de medición durante la primera prueba se muestra en la Figura 46.

Figura 46.
Resultado del sistema de medición



Fuente: autor

Se repite el proceso de medición para cada uno de los listones de madera de balsa a un aproximado de 10 ejecuciones, teniendo un total de 40 mediciones. Los resultados para el listón 1 se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14.
Lecturas para listón 1

LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
53,8	5,1	9,5	0,322
51	4,2	8,9	0,311
51,4	4	9,1	0,318
52,2	4,4	8,7	0,32
50,5	4,5	9,4	0,33
54,9	4,2	8,3	0,325
53,4	4,2	8,9	0,333
53,4	4	8,2	0,327
54,5	4,4	8,2	0,325
55	3,9	8,4	0,326

Fuente: autor

La Tabla 15 muestra las lecturas obtenidas para el listón 2.

Tabla 15.
Lecturas para listón 2

LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
58,6	4,9	5,4	0,553
56,2	5,7	5,6	0,549
58,1	5,5	5,2	0,547
55,8	5,6	5,2	0,548
54,8	4,8	5,1	0,546
57,1	4,8	5,8	0,548
60	4,6	4,9	0,548
53,8	4,9	5,3	0,555
57,7	4,9	5,4	0,565
52	5,3	5,3	0,553

Fuente: autor

Las lecturas para el listón 3 se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.
Lecturas para listón 3

LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
55,4	5,9	9	0,689
56	5,2	8,6	0,683
59,6	5,3	9,3	0,684
50,9	5,4	9,3	0,685
49,1	5,2	8,9	0,685

51,5	5,6	8,6	0,693
54,6	5,1	9,2	0,689
50,5	4,8	9	0,687
51,2	5,1	8,5	0,687
53,2	5,1	8,9	0,688

Fuente: autor

La Tabla 17 muestra las lecturas para el listón 4.

Tabla 17.
Lecturas para listón 4

LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
49,7	7,4	7,5	0,361
49,8	7,9	8	0,366
49,3	7,8	8,2	0,367
44,5	8,2	7,8	0,367
50,8	8,3	7,1	0,373
46,7	7,9	6,7	0,371
50,7	7,5	7,3	0,37
45,6	7,9	6,4	0,37
42	8,1	7,6	0,368
49,1	7,7	7,5	0,368

Fuente: autor

Se obtiene el promedio en las lecturas de cada listón de madera de balsa para los diferentes parámetros como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18.
Promedio de lecturas en cada listón

	LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
Listón 1	53,0	4,3	8,8	0,324
Listón 2	55,9	5,1	5,3	0,551
Listón 3	53,2	5,4	8,9	0,687
Listón 4	47,8	7,9	7,4	0,368

Fuente: autor

Para la validación del sistema de medición se obtiene las dimensiones reales de cada listón de madera de balsa, así como su masa. La Tabla 15 permite visualizar los valores reales para cada parámetro.

Tabla 19.
Dimensiones reales de listones

	LARGO (cm)	ALTO (cm)	ANCHO (cm)	MASA (kg)
Listón 1	54,1	4,2	8,6	0,319
Listón 2	55,1	5,3	5,7	0,563
Listón 3	54,8	5,8	9,2	0,686
Listón 4	46,4	7,5	8,1	0,346

Fuente: autor

Cada variable medida es realizada por un sensor determinado, por lo que es posible calcular el error de medición de cada sensor con base a los resultados obtenidos en las Tablas 18 y 19.

La Tabla 20 resume los errores porcentuales de cada sensor para cada uno de los listones de madera de balsa.

Tabla 20.
Error porcentual

ERROR PORCENTUAL EN CADA PARÁMETRO				
	LARGO (%)	ALTO (%)	ANCHO (%)	MASA (%)
Listón 1	2,03	2,38	2,33	1,57
Listón 2	1,45	3,77	7,02	2,13
Listón 3	2,92	6,89	3,26	0,15
Listón 4	3,02	5,33	8,64	5,98

Fuente: autor

Se calcula el error promedio porcentual de cada parámetro como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21.
Error promedio por parámetro

	LARGO	ALTO	ANCHO	MASA
Error promedio (%)	2,36	4,59	5,31	2,46

Fuente: autor

A partir de la tabla de errores porcentuales se puede observar que los errores de medición en cada parámetro se mantienen por debajo de un 6%.

Se calcula la densidad de cada pallet de madera de balsa con base a los datos de la Tabla 18 y 19, tal como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22.
Densidades de pallets de madera de balsa

	LISTÓN 1	LISTÓN 2	LISTÓN 3	LISTÓN 4
Densidad obtenida con dispositivo (kg/m ³)	163,95	366,18	269,74	137,68
Densidad obtenida de forma manual (kg/m ³)	163,24	338,23	234,61	122,75

Fuente: autor

A partir de los datos de la Tabla 22, se determina el porcentaje de error para las densidades obtenidas por cada pallet de madera de balsa.

Tabla 23.
Error porcentual de densidades

	LISTÓN 1	LISTÓN 2	LISTÓN 3	LISTÓN 4
Error porcentual (%)	0,44	8,26	14,97	12,16

Fuente: autor

En relación con el tiempo empleado para obtener la densidad del listón de madera de balsa. Experimentalmente, se ejecuta un total de 40 mediciones en un tiempo aproximado de 17 minutos empleando el dispositivo para realizar el proceso de adquisición y registro de datos. En contraste, para obtener la densidad de los pallets de madera de balsa de forma manual, utilizando flexómetro o cinta métrica y una balanza, el mismo proceso requiere un aproximado de 40 minutos, valor que puede variar dependiendo de la destreza del operario.

Dichos valores de tiempo permiten determinar un porcentaje de incremento en el proceso de producción, porcentaje que toma el valor de 235,29%

Por lo que se visualiza un incremento de 235 % para el proceso de producción, es decir, se procesa más del doble de listones de madera de balsa empleando el dispositivo, que realizándolo de forma manual.

Considerando el porcentaje de error obtenido durante el desarrollo de las pruebas de funcionamiento, se recomienda la implementación de sensores de distancia láser industriales, los cuales llegan a presentar mayor robustez, junto a una exactitud y precisión considerables. De esta manera se puede lograr reducir el porcentaje de error en cada proceso de medición. Una alternativa de solución ante esta propuesta es el sensor OY1P303P010 de la empresa Sensing, el cual es un sensor de distancia láser de hasta 3 m con salida analógica, tal como muestra la Figura 47.

Figura 47.
Sensor de distancia láser industrial



Fuente: sensing.es

Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

El uso de metodologías en el desarrollo de productos permitió determinar los requerimientos del cliente, los cuales, mediante la matriz QFD, se evaluaron para establecer los parámetros de diseño, mismos que se relacionan a la resistencia mecánica del dispositivo, dimensiones adecuadas, elementos electrónicos de bajo costo, y a mantener estabilidad en el sistema de medición.

Para cumplir con los parámetros especificados durante la fase de diseño se emplea la metodología DFMA y herramientas CAD con el objetivo de garantizar una rápida y sencilla fabricación, así como ensamblaje. El diseño del dispositivo presenta dimensiones adecuadas con base a las medidas máximas que pueden presentarse en los pallets de madera de balsa, así como para los elementos complementarios, por lo que se cuenta con un dispositivo de 1501 mm de largo, 601 mm de ancho y 1650 mm de alto. La estructura del dispositivo está basada en acero para asegurar la resistencia mecánica de la misma, donde por medio de un análisis de elementos finitos de dos diferentes softwares, se determinó el modelo adecuado de estudio, el cual fue sometido a combinaciones de carga establecidas por la Norma Ecuatoriana de la construcción, permitiendo obtener un factor de seguridad mínimo de 2,62 para una combinación de carga de 1,2 veces la carga muerta y 1,6 veces la carga viva. Así mismo, se empleó sensores que pueden ser calibrados por software y elementos de procesamiento de bajo costo disponibles en el mercado local, así como un dispositivo de visualización adecuado para la presentación de los datos.

La implementación del dispositivo se realizó de manera eficiente debido a la aplicación de la metodología DFMA. Para ello se utilizaron diferentes procesos de fabricación como mecanizado

y manufactura aditiva, empleando soldadura como proceso de unión para la estructura y elementos de sujeción como pernos y tornillos para la ubicación de las demás piezas fabricadas.

Para validar el funcionamiento del sistema de medición se realizó un total de 40 pruebas, donde se obtuvo los parámetros de alto, ancho, largo y masa de los listones de madera de balsa proporcionados por la empresa auspiciante. Previamente, las dimensiones y masa de cada pallet se determinaron para comparar con las lecturas obtenidas por el dispositivo, el cual logra determinar las dimensiones físicas de cada pallet con un porcentaje de error máximo del 6%, mientras que el cálculo de la densidad presenta un error porcentual máximo del 15%. Por otro lado, se determinó de manera empírica un incremento en el tiempo de producción del 235% con el uso del dispositivo en comparación con el proceso manual para la obtención de la densidad.

4.2 Recomendaciones

Para el correcto uso del dispositivo se recomienda leer previamente el Manual de Usuario anexo al presente documento.

Es posible agregar mayores funciones al sistema, de tal forma que sea capaz de generar informes automáticamente sobre el producto.

Se puede mejorar el diseño de los acoples del dispositivo, principalmente de la carcasa de embebidos, de tal forma que se analice la carga térmica generada por el funcionamiento del sistema.

El dispositivo permite registrar gran cantidad de datos que dependen de la cantidad de listones de madera de balsa medidos, los cuales pueden ser analizados para determinar patrones de calidad de la madera de balsa utilizando algoritmos de inteligencia artificial o técnicas de ciencia de datos.

BIBLIOGRAFÍA

Alciatore, D., & Hestand, M. (2016). Introducción a la mecatrónica y los sistemas de medición 4ta ED.

Alvarez Cabal, R. (2014). Introducción al método de los elementos finitos. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.

ARDUINO. (2021). Arduino ® UNO R3 Target areas: Arduino ® UNO R3 Features. 1–13.

Aristega, K., & Castro, A. (2017). Plan De Exportación De Madera Aserrada De Balsa Al Mercado De Valparaíso – Chile. 153.

Avia. (2017). Data Sheet - HX-711. Avia Semiconductor, 1(1), 1–9.
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf

Bayoumi, A. M. E. (2014). Design for Manufacture and Assembly (Dfma): Concepts, Benefits and Applications. Current Advances in Mechanical Design and Production VII, 501–509.
<https://doi.org/10.1016/b978-008043711-8/50051-9>

Bolton, W. (2017). MECATRÓNICA SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA 6ta ED (Issue July).

Budynas, R., & Nisbett, K. (2019). Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley 10ED. Mc Graw Hill.

Chapra, S., & Canale, R. (2015). Métodos numéricos para ingenieros.

EL UNIVERSO, “La tala de madera tipo balsa crece en el Ecuador para sostener los proyectos energéticos renovables de China,” 2021. Online. Disponible en:
<https://www.eluniverso.com/noticias/2020/09/26/nota/7991890/balsa-ecuatoriana-exportacion-record/>

Farnell, & Newark. (2019). Raspberry Pi 7” Touch Screen Display. Datasheet, 2.
www.farnell.com

Floyd, T. L. (2016). Fundamentos de sistemas digitales 11va ED.

Hernández Marcillo, K., & Petroche García, A. M. (2017). Análisis de las exportaciones de balsa a Reino Unido en los últimos 6 años.

INEN. (2016). Muebles de oficina. Escritorios y mesas. Requisitos.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2012). INEN 1160 Maderas. Determinación del contenido de Humedad.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1981). INEN 602.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1162 : 2013 Primera revisión. Instituto Ecuatoriano de Normalización, First Edit, 7–12. https://gestionambiental.pastaza.gob.ec/biblioteca/legislacion-ambiental/patrimonio_natural/n-te_inen_2176_1_agua_calidad_agua_muestreo_tecnicas_muestreo.pdf

Kallewaard Echeverri, V., Vanegas Useche, L. V., & Burbano Jaramillo, J. C. (2016). Diseño para manufactura y ensamble. *Informador Técnico*, 68, 36. <https://doi.org/10.23850/22565035.812>

Kotlarewski, N. J., Belleville, B., Gusamo, B. K., & Ozarska, B. (2016). Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(1), 83–89. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0983-0>

Marini, C. D., Fatchurrohman, N., Azhari, A., & Suraya, S. (2016). Product Development using QFD, MCDM and the Combination of these Two Methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012089>

Merchán, W., & León, C. (2017). ANÁLISIS DE LAS OPORTUNIDADES DE EXPORTACIÓN DE Balsa Y DE LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES MEDIANTE LOS BENEFICIOS DE LA ECONOMÍA POPULAR Y SOLIDARIA.

Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones. (2019). PROTOCOLO TÉCNICO, LOGÍSTICO Y DE SEGURIDAD PARA LA EXPORTACIÓN DE MADERA Y SUS DERIVADOS (pp. 1–34).

Moncayo, G., Narváez, C., Villacís, N., & Melo, J. (2018). Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (*Ochroma Pyramidale*) Ecuatoriana. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1), 61–64. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.788>

Naiju, C. D. (2021). DFMA for product designers: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 7473–7478. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.134>

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). NEC-SE-CS-Cargas (No Sísmicas). In *Ministerio de desarrollo Urbano y vivienda*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-CG.pdf>

- Ortiz P, C. M. (2018). Caracterización de la densidad de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) en dos zonas edafoclimáticas de la costa ecuatoriana. 29.
- PINARGOTE, E. (2019). DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE MADERA DE Balsa (*Ochroma pyramidale* Cav. Ex Lam. Urb.) EN PLANTACIONES COMERCIALES DE CUATRO DIFERENTES EDADES EN EL LITORAL ECUATORIANO. *Αγαη*, 8(5), 55.
- Ramos, M., Chumbimune, S., Ayala, V., & Cuellar, J. (2019). CARACTERIZACIÓN RADIAL DE LA DENSIDAD DE LA MADERA DE *Cedrelinga cateniformis* y *Calycophyllum spruceanum* MEDIANTE EL DISEÑO DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL UTILIZANDO IMÁGENES TOMOGRÁFICAS. December.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13640.88321>
- Rao, R. Y., Koola, J. J., & Mehta, N. D. (2018). Design engineering: A curriculum on design thinking. Proceedings - IEEE 9th International Conference on Technology for Education, T4E 2018, 210–211. <https://doi.org/10.1109/T4E.2018.00055>
- RaspberryPi. (2016). Raspberry Pi 3 Model B+ Datasheet. Datasheet, 5.
<https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>
- ROBOTSHOP. (2015). Arduino Mega 2560 Datasheet. Power, 1–7.
<http://www.robotshop.com/content/PDF/ArduinoMega2560Datasheet.pdf>
- Rosas, G., Ruíz, S., de León, A., Martínez, N., & Cantú, M. (2018). Manual de Design Thinking. 48.
- SGS. (2014). Time-of-Flight ranging Sensor TOF10120. 1–7.
- Systems, E. (2020). ESP8266EX Datasheet. Espressif Systems, 31.
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- Úbeda, B. (2009). Apuntes de: Sistemas embebidos (2009). *Universidad de Murcia*, 1–30.
- Universidad De las Américas. (2017). REGLAMENTO INTERNO Seguridad y Salud del Trabajo.
- Vera Peñafiel, Z. L. (2018). La Competitividad Y Exportación De La Industria Maderera De Balsa, Ecuador Período 2010 – 2016”.
- Westcott, S., & Westcott, J. (2018). Basic Electronics Second Edition. In McGraw-Hill Education (India) Private Limited.
- Wolniak, R. (2018). The use of QFD method advantages and limitation. *Production Engineering Archives*, 18(18), 14–17. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.18.02>

Yacuzzi, E., & Martín, F. (2018). QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS. 1–37. <https://doi.org/10.1007/b138775>

Zienkiewicz, O. C. (2018). El método de los elementos finitos. Editorial Reverté.

ANEXOS

Anexo 1: Manual de Usuario

El presente Manual de Usuario brinda una breve explicación sobre el funcionamiento del dispositivo para medir la densidad de los listones de madera de balsa y su correcta utilización, así como de los posibles errores que puedan generarse. El dispositivo cuenta con una pantalla táctil, por lo que todas las acciones de control han de realizarse al establecer contacto con esta.

Sección I: Puesta en marcha del dispositivo

1. Conectar el dispositivo mediante el cable de alimentación.
2. Esperar la inicialización del dispositivo hasta que la pantalla muestre la interfaz de usuario como en la Ilustración 1. Si el proceso se ejecuta correctamente avanzar al Paso 4, caso contrario continúe al Paso 3.



Ilustración 1: Pantalla de inicio

3. En caso de presentarse en pantalla el mensaje Error de conexión como muestra la Ilustración 2, entonces avanzar a la Sección IV: Fallos del dispositivo.



Ilustración 2: Pantalla de inicio con error de conexión

4. Se muestra en pantalla tres botones para ejecutar la siguiente acción.
- Presione sobre el botón Calcular densidad para abrir la siguiente pantalla e iniciar el proceso de medición (Sección II: Adquisición de datos).
 - Presione Archivo de datos para abrir y visualizar el registro de datos almacenado (Sección III: Registro de datos).
 - Presione Apagar para finalizar la ejecución de la aplicación y apagar el dispositivo.

Sección II: Adquisición de datos

El proceso de adquisición de datos se realiza en el área de medición del dispositivo, mostrada en la Ilustración 3

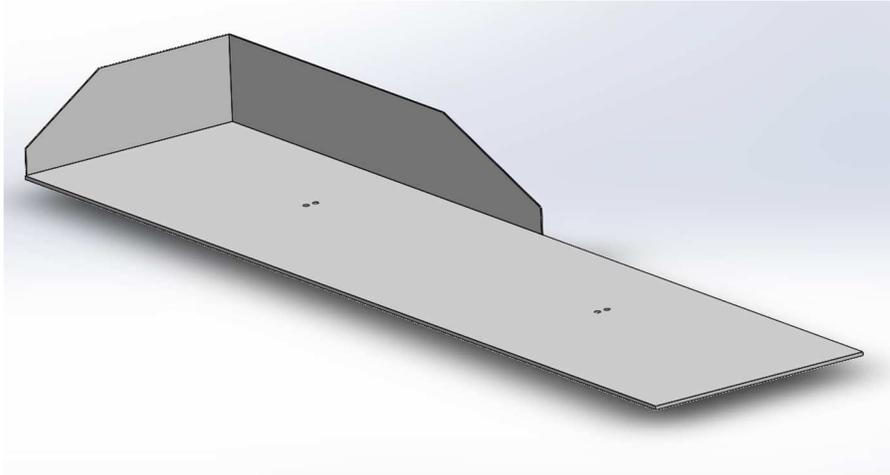


Ilustración 3: Área de medición

Una vez se haya encendido el dispositivo y se haya presionado sobre el botón Calcular densidad (Sección I: Puesta en marcha del dispositivo), aparecerá en pantalla la ventana correspondiente a los datos a medirse y calcularse como se muestra en la Ilustración 4.

ALTO (cm)	ANCHO (cm)	LARGO (cm)
0.0	0.0	0.0
VOLUMEN (cm ³)	MASA (kg)	DENSIDAD (kg/m ³)
0.0	0.0	0.0

INICIAR	AGREGAR	ELIMINAR	SALIR
---------	---------	----------	-------

Ilustración 4: Ventana para adquisición de datos

Para realizar correctamente el proceso de adquisición de datos se debe seguir los siguientes pasos:

1. Limpiar el lente de los sensores de distancia con un paño seco. Asegurar que no haya residuos de madera, polvo, pelusas u otros materiales o sustancias que puedan afectar el funcionamiento de estos. Así mismo, asegúrese que no haya otros objetos en el área de medición o cerca de ella que puedan interferir en el peso del objetivo.
2. Colocar el pallet/listón/palo de madera de balsa en la esquina izquierda del área de medición, tal como ejemplifica la Ilustración 5

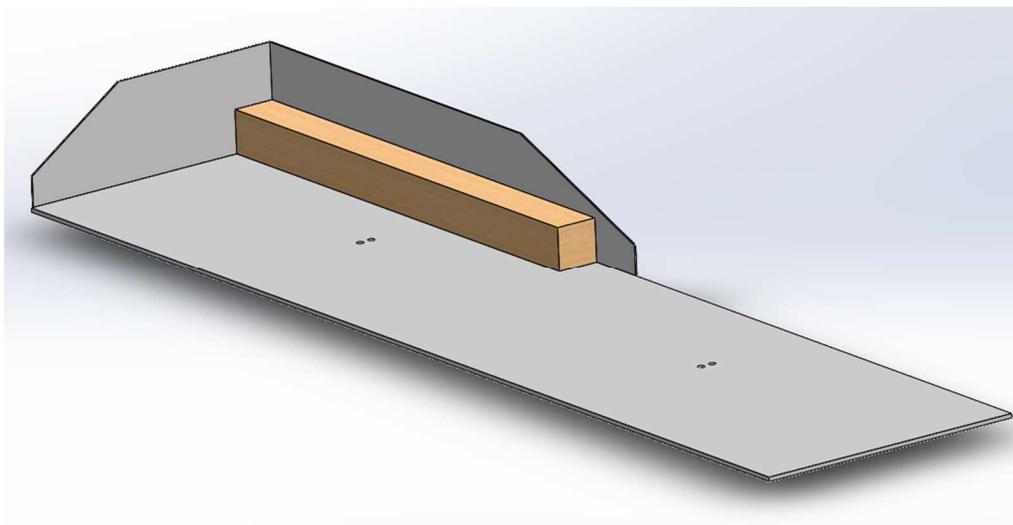


Ilustración 5: colocación del pallet/listón de madera de balsa en el área de medición

Asegúrese que el listón haga contacto con las paredes laterales del área de medición como se muestra en la Ilustración 6

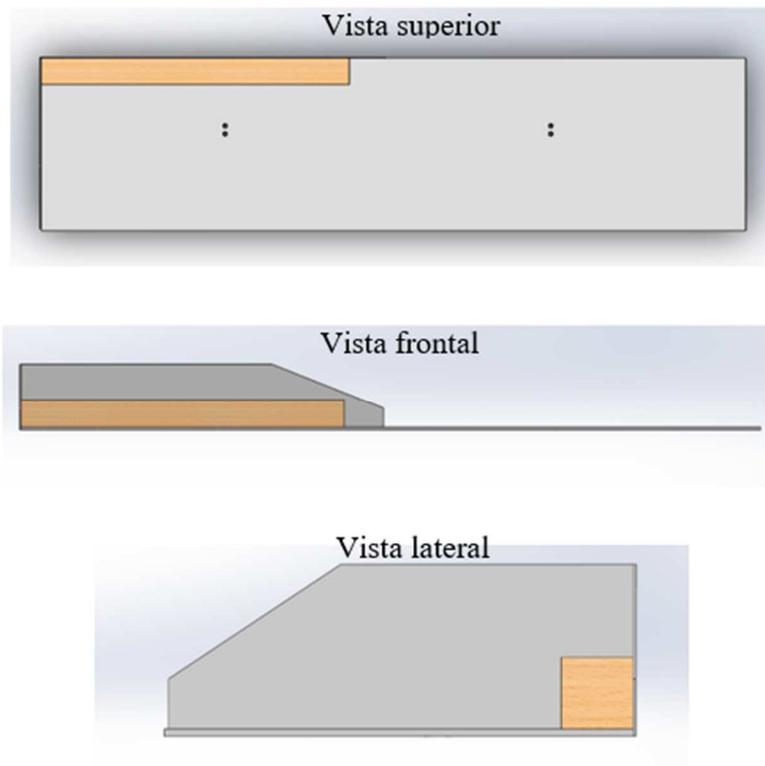


Ilustración 6: vistas ortogonales para colocación del pallet/listón

3. Colocar las piezas limitantes de tal forma que hagan contacto con el listón de madera de balsa tal como muestra la ilustración 7.

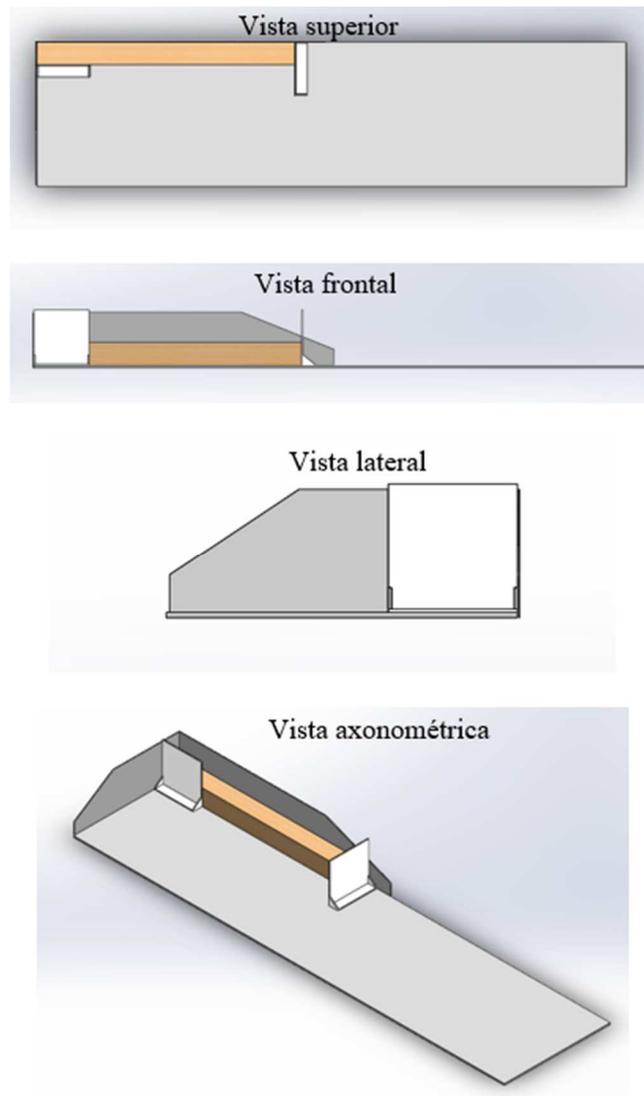


Ilustración 7. Colocación de piezas limitantes

4. En pantalla, presionar el botón Iniciar para empezar el proceso de adquisición de datos.
Los valores medidos y calculados se mostrarán en el campo respectivo.

Nota: en caso de presentarse valores repetidos, inadecuados o que no representan el objeto que se está midiendo, revisar la Sección IV: Fallos del dispositivo, Subsección 2: Errores de medición.

Sección III: Registro de datos

El registro de datos tiene por objetivo almacenar las lecturas obtenidas en la Sección II del presente manual de usuario, de tal forma que el operario tenga acceso a la visualización de estos mediante la pantalla del dispositivo.

Para registrar nuevos datos es necesario haber realizado los procesos descritos en la Sección I y II del presente manual de usuario.

Una vez se cuente con los nuevos datos y se desee añadir dichos valores al archivo de registro, se debe pulsar el botón Agregar que se muestra en pantalla. En caso de no realizar ninguna acción se deberá Eliminar los datos actuales mediante el botón Eliminar o presionar nuevamente el botón Iniciar para reemplazar los valores con una nueva lectura. La ilustración 7 muestra la ventana para el proceso de registro de datos.

ALTO (cm)	ANCHO (cm)	LARGO (cm)
0.0	0.0	0.0
VOLUMEN (cm ³)	MASA (kg)	DENSIDAD (kg/m ³)
0.0	0.0	0.0

INICIAR

AGREGAR

ELIMINAR

SALIR

Agrega los datos al archivo CSV

Ilustración 8: ventana para registro de datos

El archivo de datos almacenados contiene información respecto a las variables: alto, ancho, largo, masa, densidad y fecha de medición.

Para visualizar el registro de datos es necesario haber realizado el proceso descrito en la Sección I: Puesta en marcha del dispositivo. La función de visualización estará disponible independientemente de si se presenta o no errores de conexión.

Al pulsar sobre el botón Archivo de datos se desplegará una nueva ventana tal como se muestra en la Ilustración 8.

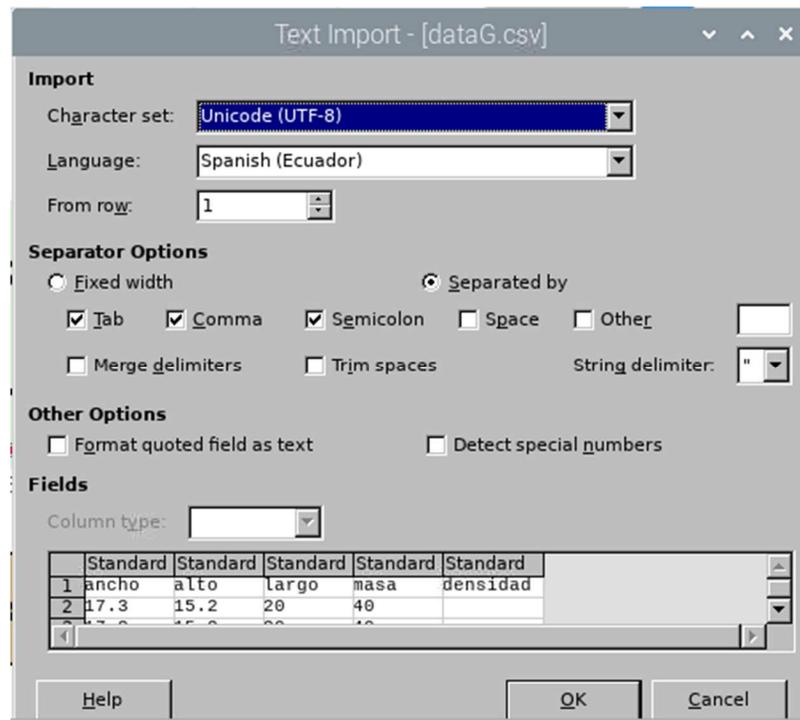


Ilustración 9: pre-ventana para visualización de datos registrados

Presionar OK para continuar a la tabla que contiene el registro de datos. La ilustración muestra el resultado esperado

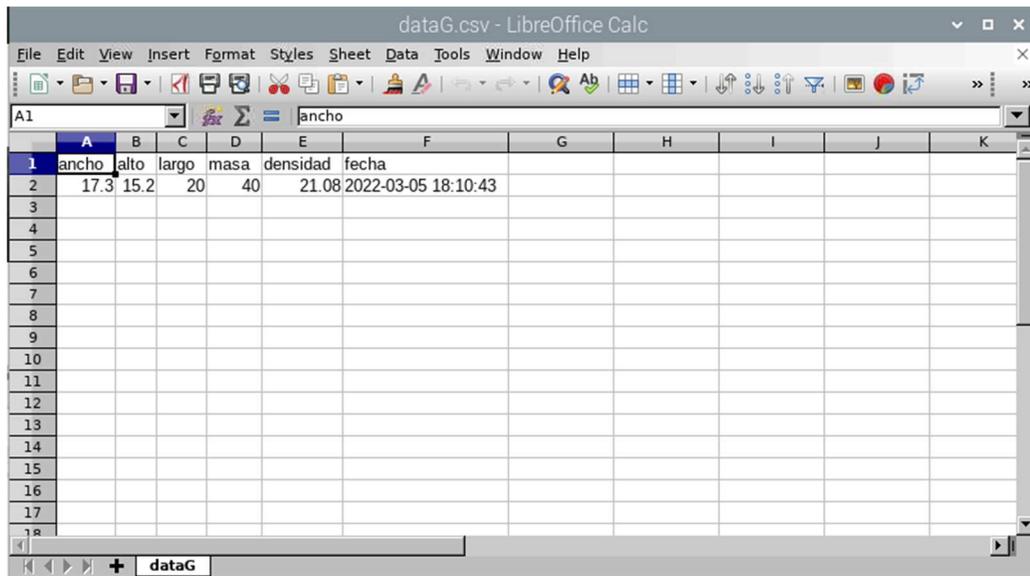


Ilustración 10: ventana para visualización de datos

Presione X en el botón de la parte superior derecha para cerrar el archivo de datos y regresar a la pantalla principal.

Sección IV: Fallos del dispositivo

La presente sección tiene por objetivo brindar información sobre los posibles errores que han de presentarse durante el funcionamiento del dispositivo.

Subsección 1: Error de conexión

El Error de conexión se ha de presentar al no detectarse la placa Arduino, lo cual puede producirse debido a diversos factores dentro de los cuales se contempla: cable de conexión Arduino – Raspberry desconectado o dañado, placa Arduino Mega 2560 dañada.

Para solucionar este posible error será necesario desmontar la carcasa de embebidos y revisar el origen del fallo presentado, de acuerdo con ello, implementar las medidas de mantenimiento correctivo necesarias.

Subsección 2: errores en presentación de datos

Durante el proceso de adquisición de datos puede presentarse errores en la presentación de datos almacenados en memoria, es decir, las lecturas de los sensores se muestran repetidos a pesar de colocar un listón de madera de balsa de dimensiones diferentes. Para corregir este error puede ejecutarse nuevamente el proceso de medición, presionando el botón ELIMINAR para limpiar la pantalla y posteriormente el botón INICIAR para adquirir las lecturas actualizadas.

Sección V: Mantenimiento

Se contemplan algunas acciones a implementarse para realizar el mantenimiento del dispositivo de carácter preventivo y correctivo.

Subsección 1: Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo del dispositivo contempla algunas acciones para alargar la vida útil del mismo, además, recomienda hacer uso de la Sección VI: Buen uso del dispositivo

- Limpieza diaria del dispositivo (área de medición y lentes de sensores) con un paño seco.
- Realizar una inspección externa periódica del dispositivo para asegurar que no haya objetos extraños que puedan afectar el funcionamiento de este.
- Limpieza de la pantalla del dispositivo con un paño seco.

Subsección 2: Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo del dispositivo conlleva a una intervención de personal técnico, por lo que no se recomienda realizarlo sin una previa capacitación del funcionamiento de este. A continuación, se presenta una tabla donde se muestra algunos posibles fallos que requieran mantenimiento correctivo y algunas acciones a considerar para su solución.

ERROR EN EL DISPOSITIVO	ACCIONES POR CONSIDERAR
El dispositivo no enciende al conectarse	<ul style="list-style-type: none">- Revisar fuente de alimentación- Revisar cable de alimentación- Revisar funcionamiento de placa Raspberry Pi
La interfaz de usuario no está disponible al encenderse el dispositivo	<ul style="list-style-type: none">- Revisar configuraciones de placa Raspberry Pi- Revisar archivos de programación
Se presenta Error de conexión al iniciar el dispositivo	<ul style="list-style-type: none">- Revisar cable de conexión Arduino – Raspberry- Revisar funcionamiento de placa Arduino
La aplicación se cierra inesperadamente	<ul style="list-style-type: none">- Revisar funcionamiento de placa Raspberry Pi- Revisar configuraciones de placa Raspberry- Revisar consumo de placa Raspberry
No se registran mediciones o hay variables con valores no disponibles (NA)	<ul style="list-style-type: none">- Revisar cables de conexión de sensores a placa Arduino- Revisar funcionamiento de placa Arduino- Revisar funcionamiento de sensores
El dispositivo se apaga inesperadamente	<ul style="list-style-type: none">- Revisar fuente de alimentación

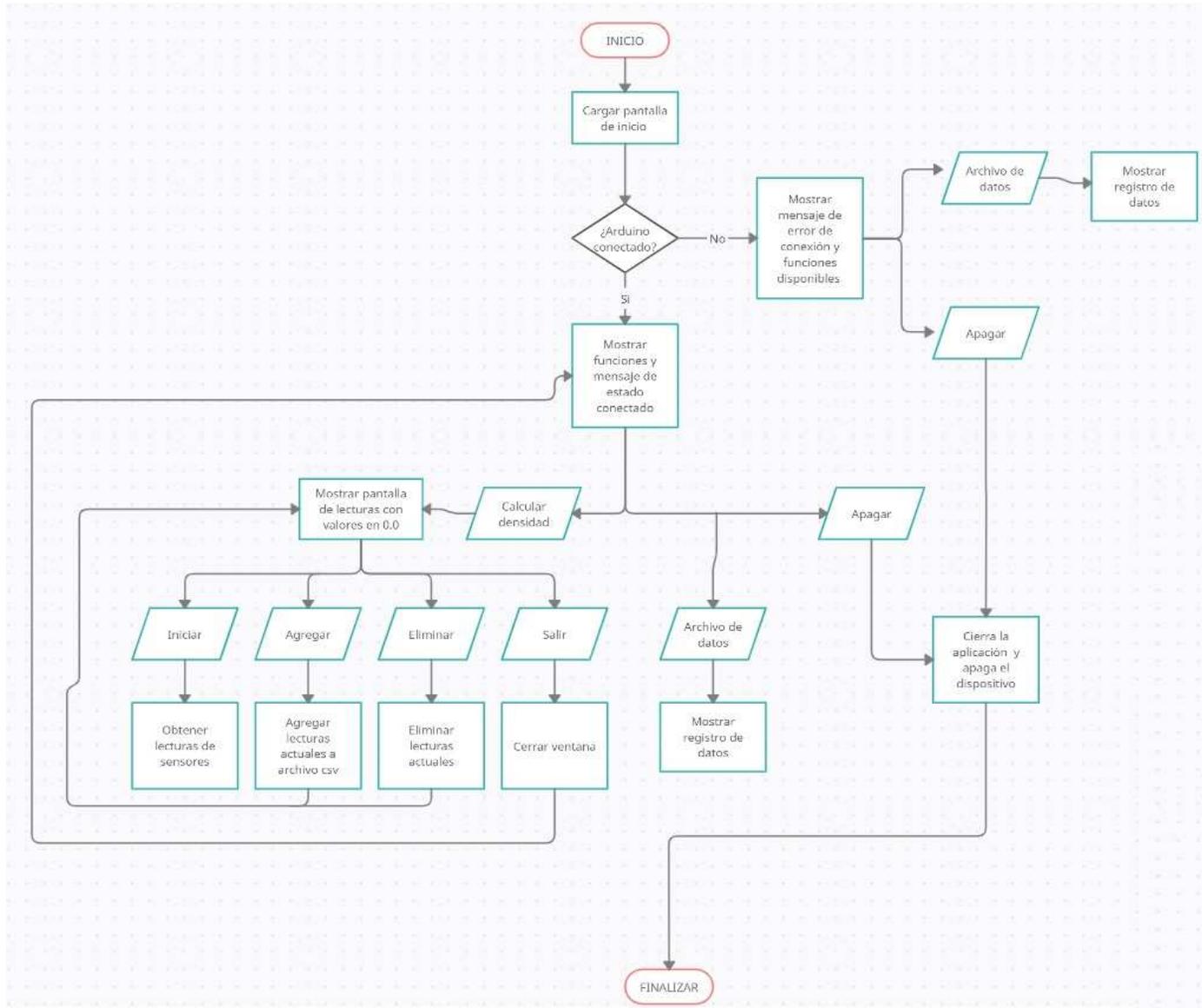
	- Revisar cable de alimentación
Los botones no ejecutan su función correctamente	- Revisar código de programación - Revisar funcionamiento de pantalla táctil
La pantalla táctil no reacciona al contacto	- Revisar conexiones Display – Placa Raspberry - Revisar funcionamiento del táctil del Display
Carcasas rotas o con fisuras	- Reemplazar el elemento roto o fisurado

Sección VI: Buen uso del dispositivo

La presente sección contiene recomendaciones para el buen uso del dispositivo.

- Evitar el contacto de objetos extraños con la pantalla.
- Evitar retirar el plástico de protección de la pantalla.
- Al mover o trasladar el dispositivo se recomienda flexionar por completo el soporte flexible de la carcasa de embebidos, de tal forma que la pantalla apunte hacia el piso.
- Evitar colocar objetos en el área de medición con una masa superior a la establecida por el límite de los sensores 40kg.
- Evitar el contacto brusco de la mano o dedos con la pantalla táctil.
- Apagar el dispositivo haciendo uso del botón designado (Sección I).
- Evitar desconectar el dispositivo de la fuente de alimentación para apagarlo.

Anexo 2: Diagrama de Flujo de la interfaz gráfica



Anexo 3: Códigos de programación

3.1 Módulo de adquisición de datos

```
-
#include <HX711.h>
#include <Wire.h>

String msg;
byte pinData1 = A0;
byte pinClk1 = A1;
byte pinData2 = A2;
byte pinClk2 = A3;

unsigned char ok_flag;
unsigned char fail_flag;

unsigned short lenth_val = 0;
unsigned char i2c_rx_buf[16];
unsigned char dirsend_flag=0;

HX711 celda1;
HX711 celda2;
float factor_calibracion = 207390;
float masa1 = 0;
float masa2 = 0;
float masa = 0;
float ancho = 0;
float alto = 0;
float largo = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  celda1.begin(pinData1, pinClk1);
  celda2.begin(pinData2, pinClk2);
  celda1.set_scale(factor_calibracion);
  celda2.set_scale(factor_calibracion);
  //celda1.tare();
  //celda2.tare();
  long zero_factor1 = 207390;//celda1.read_average();
  long zero_factor2 = 207390;//celda2.read_average();
  Wire.begin();
  Serial1.begin(9600, SERIAL_8N1);
  printf_begin();
}

void loop() {
  sendData();
}
}
```

```

void sendData() {
    ancho = ReadAncho();
    alto = ReadAlto();
    largo = ReadLargo();
    masa = ReadMasa();
    String Datos = String(ancho) + ";" + String(alto) + ";" + String(largo) + ";" + String(masa);
    Serial.println(Datos);
}

float ReadMasa(){
    masa1 = -1.01;
    masa2 = 0;

    masa1 = masa1 + (-1 * celda1.get_units(10));
    masa2 = masa2 + (-1 * celda2.get_units(10));
    masa = masa1 + masa2;
    return masa1;
}

int serial_putc( char c, struct __file * )
{
    Serial1.write( c );
    return c;
}

void printf_begin(void)
{
    fdevopen( &serial_putc, 0 );
}

```

```

void SensorRead(unsigned char addr,unsigned char* datbuf,unsigned char cnt,int x)
{
    unsigned short result=0;
    Wire.beginTransaction(x);
    Wire.write(byte(addr));
    Wire.endTransmission();
    delay(1);
    Wire.requestFrom(x, cnt);
    if (cnt <= Wire.available()) {
        *datbuf++ = Wire.read();
        *datbuf++ = Wire.read();
    }
}

int ReadAncho() {
    SensorRead(0x42,i2c_rx_buf,2,66);
    lenth_val=i2c_rx_buf[0];
    lenth_val=lenth_val<<8;
    lenth_val|=i2c_rx_buf[1];
    delay(300);
    return lenth_val;
}

int ReadAlto() {
    SensorRead(0x5C,i2c_rx_buf,2,92);
    lenth_val=i2c_rx_buf[0];
    lenth_val=lenth_val<<8;
    lenth_val|=i2c_rx_buf[1];
    delay(300);
    return lenth_val;
}

int ReadLargo() {
    SensorRead(0x4E,i2c_rx_buf,2,78);
    lenth_val=i2c_rx_buf[0];
    lenth_val=lenth_val<<8;
    lenth_val|=i2c_rx_buf[1];
    delay(300);
    return lenth_val;
}

```

3.2 Interfaz gráfica de usuario

```
import serial, time
import sys
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow, QMessageBox, QDialog
from PyQt5 import uic
import ingenious_nc
import leerSensores as sensor
import csvFile
from pathlib import Path
import subprocess

class Principal(QMainWindow):
    def __init__(self):
        QMainWindow.__init__(self)
        uic.loadUi('principal.ui', self)
        self.btnContinuar.clicked.connect(self.conectar)
        self.ventana = Ventana()
        self.btnArchivo.clicked.connect(self.archivo)
        self.btnCerrar.clicked.connect(self.cerrar)
        fileName = "/home/pi/Desktop/dataG.csv"
        fileObj = Path(fileName)
        if fileObj.exists():
            pass
        else:
            csvFile.crearCSV()
        try:
            with serial.Serial("/dev/ttyUSB0", 115200, timeout=1) as arduino:
                time.sleep(0.1)
                if arduino.isOpen():
                    self.btnContinuar.show()
                    self.lblEstado.setText('Estado: Conexión exitosa')
                except:
                    self.lblEstado.setText("Estado: Error de conexión")
                    self.btnContinuar.hide()

    def conectar(self):
        self.ventana.exec_()

    def cerrar(self):
        self.close()

    def archivo(self):
        subprocess.call(['libreoffice', '--calc', '/home/pi/Desktop/dataG.csv'])

class Ventana(QDialog):
    def __init__(self):
        QDialog.__init__(self)
        uic.loadUi('ventanaDatos.ui', self)
        self.btnAgregar.clicked.connect(self.agregar)
        self.btnEliminar.clicked.connect(self.eliminar)
        self.btnIniciar.clicked.connect(self.iniciar)
        self.btnSalir.clicked.connect(self.salir)
        self.lblAgregado.hide()

    def showEvent(self, event):
        self.lblAncho.setText(str(0.0))
        self.lblAlto.setText(str(0.0))
        self.lblLargo.setText(str(0.0))
        self.lblVolumen.setText(str(0.0))
        self.lblMasa.setText(str(0.0))
        self.lblDensidad.setText(str(0.0))

    def iniciar(self):
        global lecturas
        lecturas = sensor.obtenerLectura()
        ancho = 500 - float(lecturas[0])
        alto = 300 - float(lecturas[1])
        largo = 1400 - float(lecturas[2])
        masa = float(lecturas[3])
        volumen = ancho * alto * largo / 100
        densidad = masa / (volumen / 100 ** 3)
        self.lblAncho.setText(str(ancho / 10))
        self.lblAlto.setText(str(alto / 10))
        self.lblLargo.setText(str(largo / 10))
        self.lblVolumen.setText(str(volumen))
        self.lblMasa.setText(str(masa))
        self.lblDensidad.setText(str(densidad))

    def agregar(self):
        csvFile.agregaDato(lecturas)
        self.lblAncho.setText(str(0.0))
        self.lblAlto.setText(str(0.0))
        self.lblLargo.setText(str(0.0))
        self.lblVolumen.setText(str(0.0))
        self.lblMasa.setText(str(0.0))
        self.lblDensidad.setText(str(0.0))
        self.lblAgregado.show()
        time.sleep(1)
        self.lblAgregado.hide()

    def eliminar(self):
        sensor.obtenerLectura()
        global lecturas
        lecturas = ['0.0', '0.0', '0.0', '0.0', '0.0']
        self.lblAncho.setText(str(0.0))
        self.lblAlto.setText(str(0.0))
        self.lblLargo.setText(str(0.0))
        self.lblVolumen.setText(str(0.0))
        self.lblMasa.setText(str(0.0))
        self.lblDensidad.setText(str(0.0))

    def salir(self):
        self.close()

lecturas = ['0.0', '0.0', '0.0', '0.0', '0.0']
app = QApplication(sys.argv)
principal = Principal()
principal.show()
app.exec_()
```