

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica

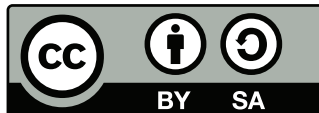


Automatización de la toma de medidas de árboles por medio de un dendrómetro

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica
con el grado académico de Licenciatura

Jeimmer García Herrera

Cartago, 12 de junio de 2024



Este trabajo titulado por Jeimmer García Herrera , se encuentra bajo la Licencia Creative Commons [Atribución-ShareAlike 4.0 International](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Para ver una copia de esta Licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Declaro que el presente documento de tesis ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de tesis realizado y por el contenido del presente documento.



Jeimmer García Herrera

Cartago, 12 de junio de 2024 Céd: 5-0408-0224

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Jeimmer Garcia Herrera

Proyecto: Automatización de la toma de medidas de árboles por medio de un dendrómetro



Dr. -Ing. Yeiner Arias Esquivel

Asesor

12 de junio, Cartago.

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jeimmer Garcia Herrera

Proyecto: Automatización de la toma de medidas de árboles por medio de un dendrómetro

Miembros del jurado evaluador



MSc. -Ing. Roger Meléndez Poltronieri

Jurado



Ing. Paula Elena Monge Chanto

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

12 de junio, Cartago.

Resumen

El presente trabajo aborda la automatización de un proceso de medición de cambios en el diámetro de los árboles mediante un dendrómetro manual, con el objetivo de almacenar los datos y hacerlos fácilmente accesibles, proporcionando información relevante sobre las condiciones atmosféricas. La importancia de este estudio radica en la necesidad de facilitar la toma de mediciones con un dendrómetro y aumentar la cantidad de mediciones que se pueden realizar.

Para alcanzar los objetivos, se empleó la metodología de Ulrich-Epinger. Se eligió utilizar un potenciómetro de precisión con protección ambiental y se diseñaron piezas mediante impresión 3D utilizando material PETG. El dendrómetro manual seleccionado es el dendrómetro de banda, y como plataforma de control se utilizó un Arduino UNO. El trabajo incluyó la investigación de tipos actuales de dendrómetros y prototipos, además del diseño de piezas en CAD y la implementación de dispositivos analógicos y digitales.

Los resultados obtenidos revelan que la capacidad de medición y la precisión del dispositivo automatizado son favorables, lo cual sugiere que el desempeño del instrumento es satisfactorio. Estos hallazgos proporcionan nuevas perspectivas sobre la automatización y la necesidad de mediciones en el campo forestal, y podrían tener aplicaciones prácticas como el dendrómetro automatizado.

En conclusión, este estudio contribuye a las buenas prácticas para la toma de medidas en el campo forestal sin invadir o afectar la flora o fauna. Además, propone un equipo de medición reutilizable y resistente a los factores ambientales, y abre nuevas vías para futuras investigaciones.

Palabras clave: Dendrómetro, Automatización, Impresión 3D, Almacenamiento de datos

Abstract

This project addresses the automation of a process for measuring changes in tree diameter using a manual dendrometer. The aim is to store the data and make it easily accessible, thereby providing important information about atmospheric conditions. The significance of this study lies in the need to facilitate dendrometer measurements and increase the number of measurements that can be taken.

To achieve the objectives, the Ulrich-Epinger methodology was employed. A precision potentiometer with environmental protection was selected, and parts were designed using 3D printing with PETG material. The chosen manual dendrometer is the band dendrometer, and an Arduino UNO was used as the control platform. The work included research on current types of dendrometers and prototypes, as well as the design of parts in CAD and the implementation of analog and digital devices.

The results obtained reveal that the measurement capability and precision of the automated device are favorable, suggesting that the instrument's performance is satisfactory. These findings provide new perspectives on automation and the need for measurements in the forestry field and could have practical applications such as the automated dendrometer.

In conclusion, this study contributes to best practices for taking measurements in the forestry field without invading or affecting the flora or fauna. Additionally, it proposes a reusable and environmentally resistant measuring device and opens new avenues for future research.

Keywords: Dendrometer, Automation, 3D printing, Data storage

Agradecimientos

A mi madre, por el gran amor y la devoción que me ha tenido, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por haberme formado como un hombre de bien, y por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla... no hay palabras en este mundo para agradecerte, mamá.

A todos mis amigos y compañeros por su apoyo y las buenas y malas experiencias que vivimos juntos, sé que nos seguiremos viendo.

Jeimmer García Herrera

Cartago, 12 de junio de 2024

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Índice de figuras | IV |
| Índice de tablas | VI |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Diagrama general de la solución | 3 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.3. Objetivos Específicos | 4 |
| 2. Marco Teórico | 5 |
| 2.1. Dasometría | 5 |
| 2.2. Dendrómetros | 6 |
| 2.2.1. Importancia de los Dendrómetros | 6 |
| 2.2.2. Tipos de Dendrómetro | 6 |
| 2.3. Sensores de medición de árboles | 8 |
| 2.4. Consideraciones para dispositivos herméticos y resistentes a golpes en entornos al aire libre | 12 |
| 2.5. Diseño y Fabricación de componentes utilizando Impresión 3D | 13 |
| 2.6. Plataforma de control | 14 |
| 2.6.1. Arduino | 14 |
| 2.6.2. Raspberry Pi | 15 |
| 2.6.3. ESP32 | 16 |
| 2.6.4. STM32 | 16 |
| 2.7. SNR | 17 |
| 3. Metodología | 19 |
| 3.1. Determinación de necesidades | 20 |
| 3.1.1. Entrevista e interpretación de necesidades | 20 |
| 3.1.2. Categorización de las necesidades | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.3. Jerarquización de necesidades | 21 |
| 3.2. Determinación de métricas y especificaciones | 22 |
| 3.3. Descomposición funcional del problema | 23 |
| 3.3.1. Entradas y salidas | 23 |
| 3.3.2. Definición de subsistemas | 24 |
| 3.4. Generación de conceptos | 26 |
| 3.4.1. Concepto 1 | 26 |
| 3.4.2. Concepto 2 | 26 |
| 3.4.3. Concepto 3 | 27 |
| 3.5. Evaluación de conceptos | 29 |
| 3.5.1. Criterios de selección de conceptos | 29 |
| 3.5.2. Evaluación de conceptos | 29 |
| 3.6. Propuesta de concepto de solución | 30 |
| 4. Sistema de medición de diámetro de arboles | 32 |
| 4.1. Dendrómetro | 32 |
| 4.2. Selección de sensor | 33 |
| 4.2.1. Evaluación del Sensor seleccionado | 34 |
| 4.2.2. Sensor de medición | 35 |
| 4.3. Encapsulado y protección del sensor | 37 |
| 4.3.1. Diseño del sujetador | 37 |
| 4.3.2. Encapsulado | 39 |
| 4.4. Selección del microcontrolador | 41 |
| 4.4.1. Evaluación del microcontrolador seleccionado | 42 |
| 4.4.2. Digitalización de la medición | 42 |
| 4.4.3. Implementación del sistema de almacenamiento | 43 |
| 4.4.4. Prototipo | 45 |
| 5. Resultados y análisis | 46 |
| 5.1. Prototipo Inicial | 46 |
| 5.2. Pruebas de funcionamiento | 46 |
| 5.2.1. Validación de piezas mecánicas diseñadas | 47 |
| 5.2.2. Funcionamiento de la plataforma de control | 48 |
| 5.2.3. Medición del cambio de diámetro | 50 |
| 5.3. Otras pruebas | 54 |
| 5.3.1. Análisis financiero | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 6. Conclusiones y recomendaciones | 57 |
| 6.1. Conclusiones | 57 |
| 6.2. Recomendaciones | 58 |
| Bibliografía | 59 |
| A. Apéndice | 63 |
| A.1. Entregable 1. Documento donde se enliste las diversas piezas y su estado, así como el nuevo equipo con el que se dispone para el nuevo diseño. | 63 |
| A.2. Entregable 3. Diagrama de flujo de proceso lógico del sistema de automa- tizado. | 64 |
| A.3. Código del microcontrolador | 65 |
| A.4. Datos de Validación SNR | 68 |
| A.5. Datos de validación de medición de precisión | 68 |
| A.6. Entregable 2. Planos de piezas diseñadas | 69 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Diagrama general de la solución | 3 |
| 2.1. Dendrómetro de banda [11] | 7 |
| 2.2. Dendrómetro de punto [12] | 8 |
| 2.3. Potenciómetros [14] | 9 |
| 2.4. Transformador diferencial de desplazamiento lineal [15] | 9 |
| 2.5. Galga extensométrica [16] | 10 |
| 2.6. Inductor variable [18] | 11 |
| 2.7. Codificador rotatorio [20] | 12 |
| 2.8. Clasificación IP [24] | 13 |
| 2.9. Arduino UNO [27] | 15 |
| 2.10. Raspberry Pi 4 [28] | 15 |
| 2.11. ESP32 [31] | 16 |
| 2.12. STM32 [32] | 17 |
| 3.1. Diagrama de bloques de entradas y salidas. | 24 |
| 3.2. Diagrama de subsistemas | 24 |
| 3.3. Plantilla para el proceso de combinación de los conceptos a evaluar | 25 |
| 3.4. Concepto 1 | 26 |
| 3.5. Esquema general de conexión del concepto 1 | 27 |
| 3.6. Concepto 2 | 27 |
| 3.7. Esquema general de conexión del concepto 2 | 28 |
| 3.8. Concepto 3 | 28 |
| 3.9. Esquema general de conexión del concepto 3 | 28 |
| 3.10. Concepto Solución | 31 |
| 4.1. Comportamiento de linealidad del sensor [37] | 36 |
| 4.2. Sujetador | 38 |
| 4.3. Agujero de tapa para saliente de cable | 39 |

| | |
|---|----|
| 4.4. Acercamiento de agujero de carcasa | 40 |
| 4.5. Encapsulado | 40 |
| 4.6. Recta de mejor ajuste para la digitalización de la medición | 43 |
| 4.7. Diagrama de conexión del Modulo SD | 44 |
| 4.8. Prototipo | 45 |
| 5.1. Validación del SNR del sistema | 49 |
| 5.2. Calzas para aumento de diámetro para validación | 51 |
| 5.3. Validación con calzas para estudio de diferentes diámetros | 51 |
| 5.4. Representación gráfica de datos del dendrómetro manual y datos de dispositivo automatizado | 53 |
| A.1. Diagrama de flujo | 64 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Tabla de características de filamento para impresión 3D [25]. | 14 |
| 3.1. Interpretación de necesidades a partir de la entrevista con el cliente. | 20 |
| 3.2. Categorización de Necesidades brindadas por el cliente. | 21 |
| 3.3. Importancia relativa de las necesidades definidas | 21 |
| 3.4. Métricas definidas para la ejecución del proyecto. | 22 |
| 3.5. Valores marginales e ideales para las métricas definidas. | 23 |
| 3.6. Criterios para la selección de conceptos. | 29 |
| 3.7. Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos. | 30 |
| 4.1. Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos | 34 |
| 4.2. Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos | 42 |
| 5.1. Resultados de simulación en Inventor | 48 |
| 5.2. Resultados de toma de datos en un punto fijo | 50 |
| 5.3. Resultados de comparación de medidas manuales y mediciones del dispositivo automatizado | 52 |
| 5.4. Costo de los materiales del proyecto | 55 |
| 5.5. Costo de mano de obra | 55 |
| 5.6. Retorno de inversión | 56 |
| A.1. Tabla de componentes obtenidos en el CIF | 63 |
| A.2. Validación de SNR | 68 |
| A.3. Validación de medición del dendrometro | 69 |

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaturas y Siglas

| | |
|------|--|
| ADC | Convertidor analógico a digital |
| CIF | Centro de Investigación e Innovación Forestal |
| FS | Factor de seguridad |
| LVDT | Transformador diferencial de desplazamiento lineal |
| SNR | signal-to-noise ratio |

Capítulo 1

Introducción

El estudio del crecimiento de las plantas es una herramienta fundamental para la gestión de árboles, plantas y frutos. Conocer la magnitud del crecimiento a lo largo de periodos prolongados es crucial, ya que permite identificar en qué época del año se produce con mayor intensidad. Este conocimiento ayuda a comprender la relación entre los cuerpos vegetales y las condiciones climáticas, así como a determinar si dichas condiciones están relacionadas con el estado fisiológico de las plantas [1].

Los dendrómetros son instrumentos que permiten evaluar el estado hídrico del tallo y su respuesta a diferentes condiciones ambientales. Estas herramientas son importantes para describir el fino crecimiento que ocurre con el tiempo, como el patrón de crecimiento y su relación con las precipitaciones [1]. Además, la magnitud del crecimiento también está relacionada con la competencia por recursos con otros árboles en el bosque o en la plantación [2].

Los dendrómetros han evolucionado desde los modelos de lectura y registro manual hasta los actuales dispositivos de registro continuo y automático que almacenan datos en un registrador digital. Entre los dendrómetros automáticos más utilizados se encuentran los de banda y los de punto [3]. El dendrómetro de banda registra el crecimiento en circunferencia durante un período específico, siendo capaz de detectar cambios mínimos en el crecimiento e incluso medir las contracciones de la circunferencia del árbol [3]. Por otro lado, los dendrómetros de punto miden o registran la variación del tamaño del radio del fuste y suelen ofrecer una precisión considerable.[4]

Otro dendrómetro popular en la actualidad para mediciones continuas se basa en la tecnología LVDT (Transformador Diferencial de Variable Lineal), cuyo principio consiste en transformar el desplazamiento o deformación de un sensor en una señal eléctrica cuyo

voltaje varía según la posición o deformación del sensor.[5]

El proyecto en el que se trabajó anteriormente se llama Proyecto Irazú. En este proyecto se utilizó un satélite para enviar información. Para tomar mediciones, se decidió usar un dendrómetro con el fin de medir la captura de carbono de los árboles en relación con su crecimiento. La idea era enviar los datos al satélite y, a través de este, al CIF. El dendrómetro desarrollado utilizaba sensores ultrasónicos. Sin embargo, dejó de utilizarse porque no funcionaba adecuadamente a la intemperie y los sensores debían cambiarse cada vez que se dañaban. Además, los sensores ultrasónicos describían un círculo perfecto en las mediciones de los árboles, pero la forma de un árbol no es un círculo perfecto. Por lo tanto, la medida obtenida del delta entre el tamaño original y el nuevo valor no coincidía con la medida correcta que se obtiene mediante un proceso manual.

A raíz de las lecciones aprendidas del Proyecto Irazú, surgió la idea de desarrollar un dendrómetro mejorado. Aunque este aspecto no era el foco principal del Proyecto Irazú, se reconoció su potencial relevancia. En la actualidad, el CIF requiere un prototipo funcional de dendrómetro, con el objetivo de explorar la relación entre el crecimiento de los árboles y variables meteorológicas, especialmente las precipitaciones. Aunque este nuevo proyecto de investigación no está directamente vinculado con el Proyecto Irazú, este último ejerció influencia en la decisión del CIF de llevar a cabo esta nueva iniciativa.

Actualmente, en el Centro de Investigación en Innovación Forestal se utilizan dendrómetros manuales. El personal debe trasladarse a la zona de estudio y anotar manualmente los datos del dendrómetro. Esta metodología limita la cantidad de datos que se pueden recopilar, ya que requiere mucho tiempo y recursos. Debido a este problema, surge la idea de automatizar la toma de medidas del dendrómetro. Al automatizar este proceso, se pretende aumentar la cantidad de datos sobre el árbol en estudio y permitir el almacenamiento local de estos datos, los cuales podrán ser extraídos posteriormente por los investigadores del CIF.

1.1. Diagrama general de la solución

Como se mencionó, la implementación de un sistema automatizado para la toma de medidas con un dendrómetro en el Centro de Investigación e Innovación Forestal es de suma importancia. Esto se debe a que algunas zonas de estudio pueden estar ubicadas a largas distancias o ser de difícil acceso, lo que hace necesario contar con un dendrómetro automatizado. Este sistema permitirá verificar el crecimiento constante de los árboles en estudio durante períodos prolongados, reduciendo la necesidad de trasladarse frecuentemente a la zona de estudio. En su lugar, los datos recopilados por el dispositivo pueden ser extraídos posteriormente.

Debido a que los dendrómetros utilizados por el CIF son manuales, fue necesario buscar sensores precisos, de bajo costo y capaces de funcionar bajo diferentes condiciones atmosféricas para su uso en el proyecto. Además, fue necesario buscar una plataforma de control que pueda traducir la información del sensor y almacenar los datos obtenidos.

Con el objetivo de visualizar con mayor claridad la propuesta del sistema automatizado para el proyecto de medición del diámetro del tallo de árboles, se presenta en la figura 1.1 un diagrama general que ilustra el sistema una vez implementado.

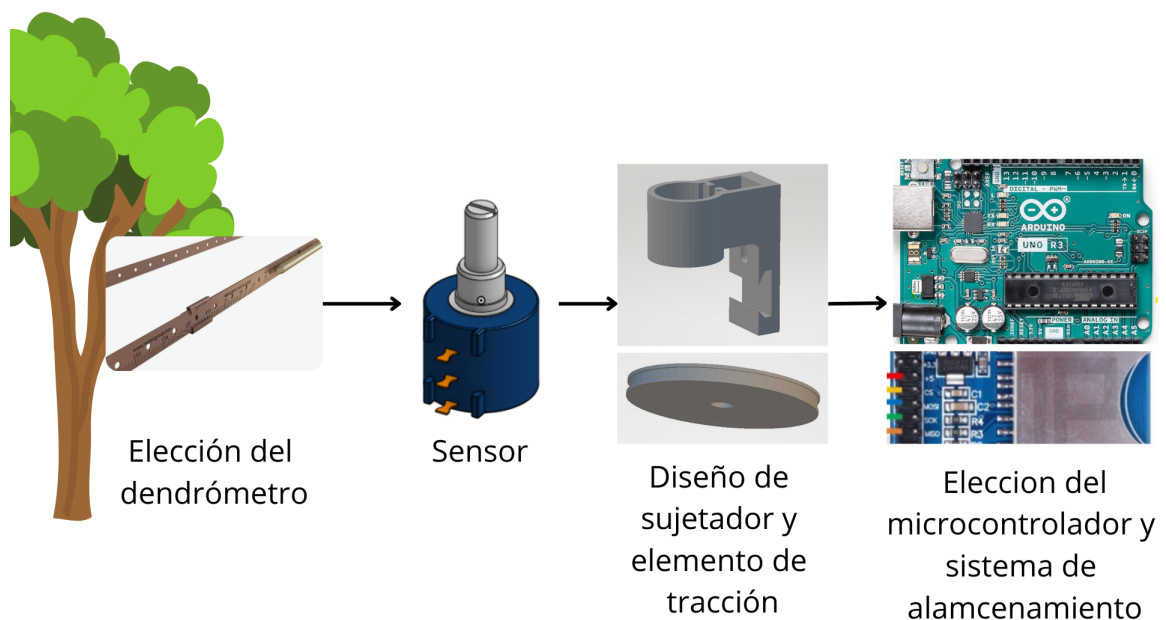


Figura 1.1: Diagrama general de la solución

En este diagrama se puede observar cómo el sistema de medición está compuesto por una fase de obtención de datos mediante un sensor, los cuales son luego traducidos por un microcontrolador. Este microcontrolador es el encargado de recibir los datos provenientes

del sistema de medición y almacenarlos para su posterior extracción y visualización por parte del personal del CIF.

El principal objetivo de este proyecto es diseñar un sistema automatizado para la lectura y almacenamiento de datos sobre el cambio en el diámetro de los árboles. Esto se logrará mediante el uso de un sensor capaz de medir pequeños cambios de tamaño en el tiempo. Además, se diseñará un sistema de almacenamiento confiable y de fácil acceso para los datos recopilados, con el fin de proporcionar información importante sobre las condiciones atmosféricas en las que se encuentra el árbol en estudio. Además, se llevarán a cabo pruebas y calibraciones para asegurar la precisión y confiabilidad de los sensores durante las mediciones.

En el capítulo 2, se presentan los conceptos teóricos que respaldan la solución propuesta en el capítulo 3. El capítulo 4 detalla las pruebas realizadas al sistema y el análisis de los datos obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas a partir de este proyecto y se ofrecen recomendaciones para futuras actualizaciones.

1.2. Objetivos

Diseñar un sistema automatizado para la lectura y almacenamiento de datos sobre el cambio en el diámetro de los árboles.

1.3. Objetivos Específicos

1. Evaluar el equipo disponible en el CIF con el propósito de determinar qué piezas se pueden reutilizar en el diseño nuevo.
2. Diseñar los elementos mecánicos que componen el dendrómetro y su sistema de control.
3. Desarrollar un sistema electrónico de medición de cambios en el diámetro y almacenamiento de los datos.
4. Validar el correcto funcionamiento del sistema automatizado mediante un proceso de mediciones en un árbol.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se abordan los aspectos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema propuesto. Además, se ofrece un panorama más amplio sobre la situación del CIF.

2.1. Dasometría

La Dasometría es una rama de la ciencia forestal que se enfoca en la medición de árboles y sus productos, así como en la determinación del volumen de los bosques y su masa forestal, investigando además la edad y el crecimiento de los mismos. Los objetivos de la Dasometría son principalmente comerciales, relacionados con la ordenación forestal y de investigación [6].

Para calcular el volumen de la madera y las masas forestales, es necesario medir la altura y el diámetro de los árboles. Estas medidas permiten determinar el área basal y el volumen. Además, la edad y el crecimiento de los árboles son otros factores que se determinan mediante mediciones. Estas mediciones pueden realizarse en árboles talados o en árboles en pie [6].

Con fines de estudio, la Dasometría se divide comúnmente en dos partes: la Dendrometría, que se enfoca en la medición y estimación de las dimensiones de árboles y bosques desde un punto de análisis estático; y la Epidimetría, que se ocupa de la medición y estimación del crecimiento y productos de árboles y bosques, es decir, desde un punto de análisis dinámico [7].

2.2. Dendrómetros

El dendrómetro es un instrumento que mide las variaciones del tronco o de cualquier otra parte de la planta, lo cual revela cómo está utilizando el agua y las tendencias de comportamiento en períodos largos. De esta manera, el dendrómetro se emplea para monitorear el crecimiento a lo largo del tiempo, con el fin de comprender mejor las interacciones entre los mecanismos fisiológicos y ambientales, así como para identificar a qué factores ambientales responden las plantas [8].

2.2.1. Importancia de los Dendrómetros

Los dendrómetros se emplean para calcular el volumen de madera que producirán los árboles, eliminando la necesidad de las fórmulas matemáticas que se utilizaban anteriormente. Además de medir el diámetro del árbol, estos dispositivos permiten anticipar la calidad de los frutos del árbol. Los dendrómetros también monitorean el estado hídrico de las plantas, lo que facilita la evaluación de la cantidad de agua necesaria y permite un mejor control del riego [9].

2.2.2. Tipos de Dendrómetro

En la actualidad, el sector agroforestal carece de dendrómetros automatizados, principalmente debido a que su precio puede resultar muy elevado. Los productores que se dedican al cultivo de especies de árboles o frutos comunes no suelen necesitar invertir en dendrómetros sofisticados. No obstante, es importante destacar que la precisión de los datos obtenidos por un dendrómetro digital es de mejor resolución, y además tiene la capacidad de recolectar una mayor cantidad de datos de manera continua.

La clasificación de los dendrómetros manuales depende de la forma en que miden el diámetro de los árboles. Si rodean el árbol, se denominan dendrómetros de banda; si se colocan en un solo punto fijo, se llaman dendrómetros de punto. También existen dendrómetros de medición continua automatizados, los cuales utilizan sensores de desplazamiento o de distancia de rangos cortos y precisos. Todos ellos funcionan en exteriores, por lo que usualmente cuentan con una resistencia de protección IP65-IP67.

Dendrómetro de banda

Un dendrómetro de banda consta de una banda de acero o plástico resistente que se rodea firmemente alrededor de la circunferencia del tronco del árbol. La banda se coloca de diferentes formas en el árbol, principalmente mediante un resorte que tensiona el dendrómetro para evitar que se caiga, permitiendo al mismo tiempo la expansión o contracción del perímetro del árbol. Una de las principales ventajas de este tipo de dendrómetro es que no daña a las plantas; es un sensor no invasivo, además de ser resistente y fácil de instalar. Las lecturas del dendrómetro corresponden directamente a los cambios de circunferencia [10].

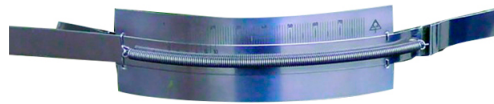


Figura 2.1: Dendrómetro de banda [11]

Dendrómetro de punto

Los dendrómetros de punto o radiales pueden adoptar varias formas, pero, como su nombre sugiere, solo miden un punto o área de superficie de un tallo o fruta. Para troncos de árboles o tallos grandes, los dendrómetros de punta constan de dos varillas: una que se perfora en el tallo para proporcionar estabilidad y la segunda que se coloca firmemente contra el xilema del tallo. En esta segunda varilla se encuentra el sensor que registra la expansión y contracción de un vástago que toca la superficie del tronco, convirtiendo estos movimientos en una señal eléctrica [10].



Figura 2.2: Dendrómetro de punto [12]

2.3. Sensores de medición de árboles

En esta sección se analizan las características de interés de los sensores que podrían llegar a utilizarse. Se describe el principio de funcionamiento de cada uno de ellos, así como su modo de utilización y se destacan posibles fortalezas y debilidades.

Potenciómetro

Un potenciómetro es un resistor de tres terminales, uno de los cuales es variable. Cuando se acciona el contacto móvil, esta terminal variable cambia su valor de resistencia. El contacto móvil puede ser rotatorio o lineal, lo que permite traducir variaciones de posición (angulares o lineales) en una resistencia.

El elemento resistivo suele estar hecho de grafito en los potenciómetros más económicos, aunque también se utilizan otros materiales. Además, existen potenciómetros construidos con membranas resistivas, lo que proporciona una mejor aislación del entorno. Estos potenciómetros son más económicos y compactos que los potenciómetros de precisión convencionales [13].

Para realizar la implementación del sensor, el potenciómetro debe acoplarse a un mecanismo que haga que las variaciones en el diámetro o circunferencia produzcan un desplazamiento o giro del mecanismo del contacto móvil del sensor.



Figura 2.3: Potenciómetros [14]

Transformador diferencial de desplazamiento lineal

EL LVDT por sus siglas en inglés consiste en tres bobinados independientes contruidos sobre el mismo eje, dentro del cual se desplaza un núcleo ferromagnético. Este núcleo está unido a un pistón que se apoya o adhiere sobre la superficie móvil a medir.

Este dispositivo se basa en la inducción electromagnética, de manera que la corriente que circula por cualquiera de los bobinados induce una fuerza electromotriz (fem) en los otros. De este modo, puede entenderse como un transformador con un único primario y dos secundarios. El bobinado central se denomina primario y es alimentado con una tensión sinusoidal, mientras que los otros dos se denominan secundarios. La salida del LVDT es la diferencia entre las salidas de cada bobinado secundario [13].

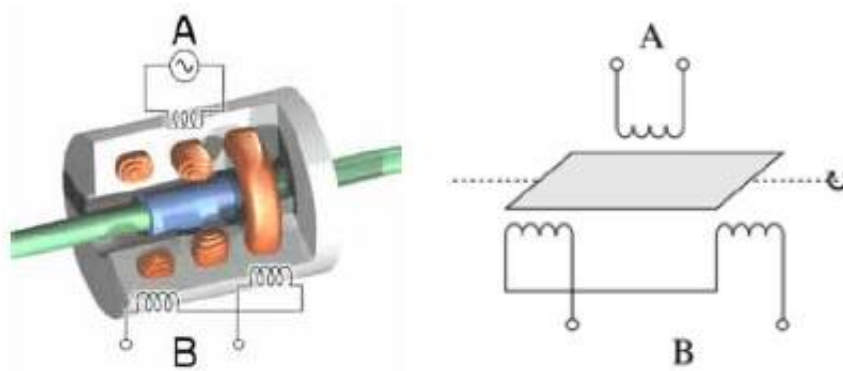


Figura 2.4: Transformador diferencial de desplazamiento lineal [15]

Como desventaja, su consumo de energía es mayor que el de la mayoría de las otras opciones, lo que lo hace poco adecuado para aplicaciones que requieren bajo consumo. Además, estos dispositivos suelen ser costosos.

Galga extensiométrica

Una galga permite medir la deformación de un material mediante variaciones de su resistencia; al estirarse o contraerse, la pista cambia sus dimensiones, alterando así la resistencia eléctrica. Se planteó utilizar la galga de manera que, cada vez que el diámetro del árbol aumente o disminuya, este sensor pueda detectar esos movimientos y, por ende, proporcionar una resistencia que pueda ser traducida a distancia.

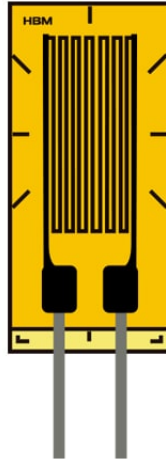


Figura 2.5: Galga extensiométrica [16]

Existen varios dendrómetros radiales que utilizan esta tecnología. Por la naturaleza de su funcionamiento, este tipo de sensor suele utilizarse con un dendrómetro de banda, ya que este asegura un contacto fijo entre la punta del dendrómetro y la corteza del árbol. Su especificación relativa al rango de medición es de 0.7 mm [17].

Existen varios tipos de galgas extensiométricas, entre las cuales destacan las galgas extensiométricas de precisión. A pesar de ser para propósito general, estas tienden a ser flexibles pero mecánicamente fuertes. Se utilizan para mediciones de deformaciones dinámicas o estáticas altamente precisas [15].

Inductor variable

Un inductor variable consta de un bobinado con un núcleo ferromagnético móvil. Al introducir parcialmente un núcleo ferromagnético en una bobina, la inductancia varía en función de la posición del núcleo.

Sin embargo, existen múltiples dificultades a afrontar para implementar un transductor con un inductor variable. La primera es que no se puede adquirir comercialmente, sino

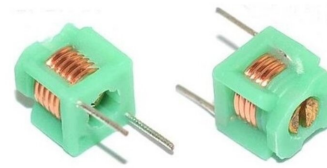


Figura 2.6: Inductor variable [18]

que debe ser fabricado y caracterizado, esperando cubrir las situaciones a las que será expuesto. Otra gran desventaja consiste en la no linealidad que posee el sensor [13].

Existen varios tipos de inductores variables, y los que se consideraron para la realización del proyecto fueron los inductores sintonizados por babosas o slug. El valor de la inductancia de un inductor sintonizado por slug se cambia al entrar o salir del núcleo magnético, similar a un inductor variable normal. Sin embargo, su construcción se asemeja a la de un inductor con núcleo fijo, aunque en este caso, los núcleos son móviles [19]. Por ende, mediante un mecanismo, se podrá manipular el núcleo de manera que la inductancia se traduzca en distancia.

Codificador rotatorio

Los codificadores rotatorios son sensores que miden la rotación de un eje mecánico. Estos dispositivos convierten los desplazamientos mecánicos en señales eléctricas, las cuales pueden ser enviadas a un procesador para su interpretación. En comparación con los potenciómetros, las salidas digitales de los codificadores rotatorios simplifican este proceso.

Dada su naturaleza electromecánica, los codificadores rotatorios requieren estar conectados con dispositivos mecánicos o con el usuario. Cuando se emplean como interfaces de control en dispositivos electrónicos, estos codificadores utilizan un eje sólido y, comúnmente, se montan en un panel de control utilizando un buje de montaje en panel junto con el hardware correspondiente [21].

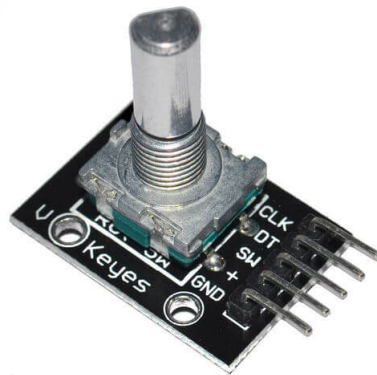


Figura 2.7: Codificador rotatorio [20]

2.4. Consideraciones para dispositivos herméticos y resistentes a golpes en entornos al aire libre

Las cualidades de la carcasa de la circuitería, además de proporcionar protección al sensor, deben incluir impermeabilidad, además de ser lo suficientemente espaciosa para almacenar todo el dispositivo cómodamente.

Las clasificaciones IP se utilizan para definir los niveles de efectividad de sellado de equipos electrónicos contra la intrusión de cuerpos extraños y la humedad.

Esta clasificación consta de dos números: el primero indica el grado de protección de las partes móviles y la protección de los equipos cerrados contra cuerpos extraños, mientras que el segundo define el nivel de protección del recinto contra diferentes formas de humedad.

Es común que el primer dígito de la clasificación IP sea el número 6, en dispositivos automáticos, ya que representa el grado máximo en esta escala del 1 al 6. En la escala IP, el número 6 indica que el equipo es totalmente hermético al polvo y otras partículas, y ha sido probado contra el flujo de aire continuo. Esto es especialmente importante, ya que la componente electrónica del dispositivo debe estar protegida de cualquier contaminante que pueda dañar el equipo o reducir su vida útil de manera significativa [22].

El segundo dígito de la clasificación IP representa la protección contra la intrusión de líquidos. Para los dendrómetros automáticos, es común encontrar clasificaciones dentro del rango de 5 a 7, que se explican a continuación:

- IP65: Significa que el dispositivo ofrece protección contra chorros de agua de baja presión. Para probar las cajas con clasificación IP65, se proyectan 12.5 litros de agua

por minuto durante al menos 15 minutos con una presión de 30 kPa a una distancia de 3m [23].

- IP66: Proporciona protección contra chorros de agua de alta presión. Los procedimientos de prueba incluyen someter la caja a 100 litros por minuto de agua con una presión de 100 kPa a una distancia de 3m durante 3 minutos [23].
- IP67: Significa que la carcasa ofrece protección contra la inmersión hasta 1m de profundidad. El método de prueba para estas carcasas incluye la inmersión a una profundidad de al menos 1m durante 30 minutos o más [23].



Figura 2.8: Clasificación IP [24]

2.5. Diseño y Fabricación de componentes utilizando Impresión 3D

El desarrollo de la impresión 3D en la actualidad facilita la creación de proyectos y prototipos debido a la posibilidad de crear objetos únicos y personalizados sin la ayuda de terceros. Esto permite fabricar piezas en tiempos muy cortos y, una de sus mejores cualidades, sin gastos en moldes ni herramientas complejas. Gracias a estas ventajas, se pueden realizar prototipos de piezas diseñadas en tiempos muy cortos, lo que permite avanzar mucho más rápido en el proceso iterativo.

Se consideraron varios tipos de filamento para ser utilizados en el proyecto, los cuales se tabularon (ver tabla 2.1). Para estos tipos de filamento, se tuvieron en cuenta características cruciales para el proyecto, como la resistencia mecánica o la resistencia a la temperatura, aspectos de gran importancia dado que el dispositivo se pretende que funcione en la intemperie, por lo que debe ser muy resistente. Además, se analizaron características como la biodegradables o la capacidad de ser reciclable del material, ya que, al tratarse en su mayoría de plásticos, se planteó tener un impacto ambiental mínimo.

Tabla 2.1: Tabla de características de filamento para impresión 3D [25].

| Tipo de filamento | Dureza | Biodegradabilidad | Resistencia mecánica | Resistencia a la temperatura | Facilidad de impresión |
|-------------------|----------|-------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| PLA | Moderada | Biodegradable | Moderada | Alrededor de 60-65C | Fácil |
| ABS | Alta | Reciclable | Alta | Deformación a partir de los 85C | Temperatura de operación alta |
| PETG | Moderada | Reciclable | Alta | Deformación a partir de los 85C | Fácil |
| TPU | Baja | Reciclable | Moderada | Alrededor de los 60C | Difícil |
| Nylon | Moderada | Biodegradable | Alta | Deformación a partir de los 80-120C | Difícil |

2.6. Plataforma de control

Esta sección proporciona información sobre las tareas que se espera que la plataforma de control lleve a cabo. Debe cumplir la función de traducir la señal del sensor y también almacenar dicha información, de manera que pueda ser recolectada por los investigadores del CIF.

El sistema debe almacenar las medidas en una memoria flash externa, lo que permite al instrumento operar sin necesidad de acceder a una red inalámbrica de sensores.

En la actualidad, existen numerosos tipos de microcontroladores que podrían ser utilizados para los fines de este proyecto. Un microcontrolador se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea específica y, debido a su reducido tamaño, suele estar incorporado en el propio dispositivo que controla.

2.6.1. Arduino

Una opción viable es la utilización de la plataforma Arduino, la cual es una plataforma de código abierto basada en hardware y software de uso sencillo. Las placas de Arduino tienen la capacidad de realizar una amplia gama de procesamientos y acciones, tales como leer entradas y convertirlas en salidas, activar motores, encender LEDs y enviar información a un servidor en línea. Para llevar a cabo estas tareas, se requiere el uso del software Arduino (IDE) [26].

Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlas de forma independiente y, eventualmente, adaptarlas a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto y está en constante crecimiento gracias a las contribuciones de usuarios de todo el mundo.

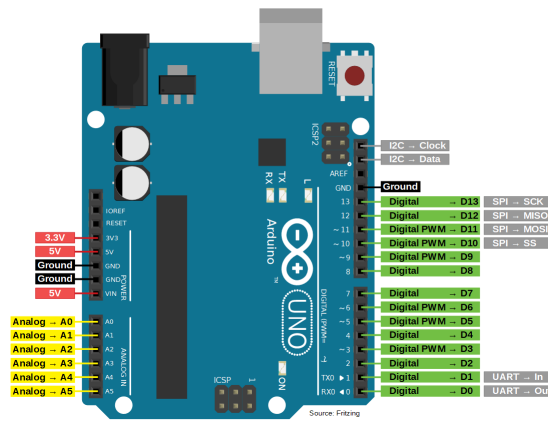


Figura 2.9: Arduino UNO [27]

2.6.2. Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo con un tamaño compacto. Este pequeño computador ejecuta un sistema operativo Linux que permite a las personas explorar esta plataforma. Además, la Raspberry Pi tiene la capacidad de interactuar con el mundo exterior y puede ser utilizada en una amplia variedad de proyectos digitales, como estaciones meteorológicas.

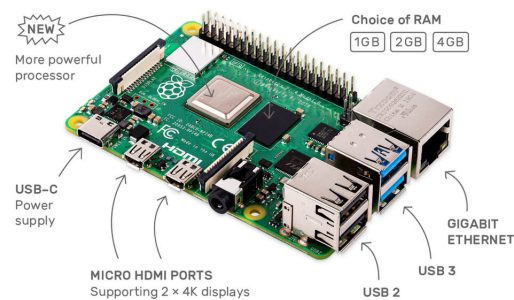


Figura 2.10: Raspberry Pi 4 [28]

Una de las Raspberry Pi más populares es la 3 B+. Esta versión cuenta con un GPIO de 40 pines, que permite la conexión con el mundo exterior, tanto para sensores como para actuadores. Es importante tener en cuenta que opera a un nivel de 3.3V. Aunque el procesador de la Raspberry Pi no incluye un convertor analógico a digital integrado, existen numerosas opciones disponibles en el mercado [29].

2.6.3. ESP32

El ESP32 es una serie de SoC (System on Chip) y módulos de bajo consumo energético y costo, desarrollado por Espressif Systems. Esta placa es capaz de lograr un consumo de energía bajo gracias a funciones de ahorro de energía, que incluyen sincronización de reloj y múltiples modos de operación. Todo esto lo convierte en la herramienta ideal para proyectos alimentados por baterías o aplicaciones IoT [30].

El ESP32 cuenta con un GPIO de 34 pines, un ADC de 12 bits de resolución y una frecuencia de 240 MHz, lo que le permite ejecutar instrucciones hasta 15 veces más rápido que un Arduino UNO. Aunque existen varias versiones de este microcontrolador con memoria integrada, es posible expandir la memoria de forma externa mediante dispositivos como una memoria flash.

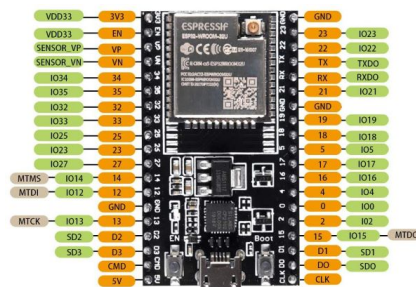


Figura 2.11: ESP32 [31]

Como se mencionó anteriormente, el ESP32 cuenta con un convertor analógico-digital de 12 bits y 18 canales, lo que significa que es posible tomar lecturas de hasta 18 sensores analógicos. Esto permite desarrollar aplicaciones conectadas muy compactas, incluso cuando se emplean varios sensores analógicos.

También cuenta con una interfaz USB y un regulador de voltaje que permiten programar fácilmente la placa utilizando Arduino IDE u cualquier otra plataforma de desarrollo compatible. [30]

2.6.4. STM32

Una placa desarrollada por STMicroelectronics que cuenta con un microcontrolador ARM Cortex de alta potencia y bajo consumo. Esta placa de desarrollo facilita la creación y evaluación de prototipos. El microcontrolador incluye un conjunto de modos de ahorro de energía que permiten diseñar prototipos con limitaciones de consumo energético.

Este tipo de placa presenta una amplia gama de dispositivos, incluyendo periféricos

analógicos como ADC de 12 bits. Una de las ventajas de utilizar un diseño estándar en la industria, como el de ARM, es que es adoptado por numerosos fabricantes, lo que garantiza la disponibilidad de una gran variedad de herramientas con diversas funciones y costos.

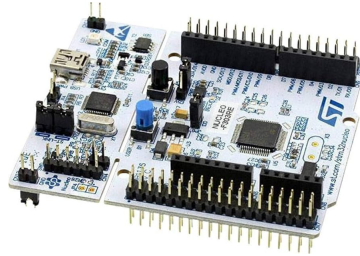


Figura 2.12: STM32 [32]

Como herramientas de desarrollo de software, podemos encontrar compiladores de distintos lenguajes que pueden utilizarse en entornos como el IDE de Arduino, Eclipse y otros, muchos de los cuales son gratuitos. También existen numerosas herramientas de hardware que simplifican el desarrollo, como programadores, depuradores y placas de evaluación [33].

2.7. SNR

SNR, de sus siglas en inglés signal-to-noise ratio, se refiere a la relación entre la señal y el ruido de la señal. Este es un indicador de la calidad de la señal. El SNR del voltaje de las señales es un indicador de fidelidad y una herramienta que ayuda a detectar incidencias de picos que pueden ser traducidos como ruido [34].

La relación señal-ruido (SNR) puede expresarse como la relación de voltaje y como una relación de potencia. Matemáticamente, S/N es:

$$\frac{S}{N} = \left[\frac{\text{Voltaje de la señal}}{\text{Voltaje del ruido}} \right]^2 \quad (2.1)$$

La relación señal-ruido (SNR) se expresa frecuentemente como una función logarítmica con la unidad de decibelios (dB). Para las relaciones de voltaje, tenemos:

$$\frac{S}{N}(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_s}{V_n} \quad (2.2)$$

La relación señal-a-ruido (SNR) es probablemente el parámetro más importante y frecuentemente usado para evaluar el funcionamiento de un amplificador en un sistema completo

de comunicaciones de radio o para comparar el funcionamiento de un amplificador o sistema con otro. Cuanto más alta sea la relación señal-a-ruido, mejor será el funcionamiento del sistema. A partir de la relación señal-a-ruido, se puede determinar la calidad general de un sistema [35].

Capítulo 3

Metodología

Para diagnosticar el problema del CIF y generar las propuestas de solución, se utiliza la metodología de Ulrich-Eppinger, descrita en el libro "Desarrollo y Diseño de Productos"[36], con ligeras variaciones. Esta metodología está diseñada para el desarrollo de productos comerciales, mientras que en este documento se busca una solución AD HOC (para un objetivo específico). La metodología plantea un conjunto de etapas que se realizan de forma iterativa hasta obtener conceptos basados en los requerimientos del cliente, los cuales son evaluados para dar solución al problema planteado.

En esta sección referente a la metodología, se desarrollan las etapas 1 y 2, las cuales contemplan la toma de decisiones para generar una solución. Para este desarrollo se llevan a cabo las siguientes etapas:

1. Determinación de necesidades
2. Determinación de especificaciones y métricas
3. Descomposición del problema
4. Búsqueda de información interna y externa
5. Generación de conceptos
6. Evaluación de conceptos
7. Propuesta de solución

Con la propuesta de solución planteada, se continúa con las etapas 2 y 3, donde se genera el diseño a nivel de sistema y el detalle de cada subsistema propuesto, con el fin de obtener una solución integral basada en un criterio técnico.

3.1. Determinación de necesidades

3.1.1. Entrevista e interpretación de necesidades

Para identificar las necesidades del CIF con respecto al proyecto en cuestión, se realizó una entrevista con el investigador Dorian Carvajal, encargado del área de Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Escuela de Ingeniería Forestal. El ingeniero Carvajal posee conocimientos sobre mediciones de árboles y diferentes tipos de dendrómetros. La entrevista consistió en una serie de preguntas que abarcaban diversos temas relacionados con el proyecto, con el fin de delimitar el problema correctamente.

Tras la entrevista, se procedió a su interpretación para extraer las necesidades basadas en las características de las problemáticas planteadas por el cliente. Además, se procuró identificar necesidades latentes no mencionadas explícitamente. La tabla 3.1 muestra la interpretación de las necesidades generadas. Para esta tabla, se aclaran los siguientes puntos:

Uso: Se refiere a aquellas propiedades del sistema que tienen que ver directamente con su utilización por un operador. Acciones: Considera todas aquellas capacidades esperadas por el cliente que el sistema debe tener para cumplir con sus objetivos. Producto: Se refiere a las mediciones tomadas que se almacenan, esperando ser extraídas posteriormente para su análisis. Problemáticas: Preocupaciones del cliente al no contar con un sistema automático para la medición del cambio de diámetro de los árboles.

Tabla 3.1: Interpretación de necesidades a partir de la entrevista con el cliente.

| | | |
|---------------|---|---|
| Cliente: | Dorian Carvajal Vanegas | Entrevistador: Jeimmer Gracia Herrera |
| Profesión: | Ingeniero e Investigador | |
| Dirección: | Costa Rica, Cartago, TEC | Fecha: 05/02/2024 |
| Tema | Mención del cliente | Necesidad interpretada |
| Uso | Hay que tratar de hacer la solución lo más sencilla posible para operarlo | El sistema es de uso intuitivo |
| Acciones | Se piensa que permita trabajar en el medio ambiente | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente |
| | Se piensa que no puede perjudicar el árbol | El sistema no es invasivo |
| | Se piensa que debe de almacenar la información | El sistema almacena la medición de las variaciones |
| | Se piensa que mida la disminución e incremento de las variaciones de diámetro | El sistema mide la disminución e incremento de diámetro |
| Producto | Que sea capaz de medir variaciones de 1mm de diámetro | El sistema mide variaciones de 1mm de diámetro |
| Problemáticas | Existen pérdidas de tiempo por desplazamiento de investigadores al tomar las mediciones | El sistema elimina las pérdidas de tiempo por el desplazamiento de los investigadores |
| | Se busca tener más cantidad de mediciones | El sistema toma mediciones frecuentemente |

3.1.2. Categorización de las necesidades

La categorización de necesidades corresponde a un conjunto de grupos que contienen las necesidades según los factores globales que contemplan la naturaleza de cada una de ellas. El resultado de esta categorización se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Categorización de Necesidades brindadas por el cliente.

| Grupo | Primer nivel | Segundo nivel |
|-------|--|---|
| 1 | El grado de complejidad de uso del sistema no es elevado. | El sistema es de uso intuitivo |
| 2 | El sistema permite medir las variaciones de diámetro de un árbol | El sistema mide la disminución e incremento de diámetro |
| | | El sistema mide variaciones de 1mm de diámetro |
| 3 | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente | El sistema toma mediciones frecuentemente |
| | | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente |
| 4 | El sistema almacena la información de las mediciones | El sistema no es invasivo |
| | | El sistema almacena la medición de las variaciones |
| | | El sistema elimina las pérdidas de tiempo por el desplazamiento de los investigadores |

3.1.3. Jerarquización de necesidades

Para jerarquizar las necesidades fue necesaria la intervención del cliente, quien determinó la importancia relativa de cada una. El documento de jerarquización fue enviado al cliente, y de ahí se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.3. La escala de 1 a 5 se interpreta de la siguiente manera:

1. Función indeseable
2. Función no importante
3. Función innecesaria pero deseada
4. Función muy deseable
5. Función indispensable

Tabla 3.3: Importancia relativa de las necesidades definidas

| Necesidad | Importancia | Importancia Relativa |
|-----------|-------------|---|
| 1 | 3 | El sistema es de uso intuitivo |
| 2 | 5 | El sistema mide la disminución e incremento de diámetro |
| 3 | 5 | El sistema mide variaciones de 1mm de diámetro |
| 4 | 3 | El sistema toma mediciones frecuentemente |
| 5 | 5 | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente |
| 6 | 4 | El sistema no es invasivo |
| 7 | 5 | El sistema almacena la medición de las variaciones |
| 8 | 4 | El sistema elimina las pérdidas de tiempo por el desplazamiento de los investigadores |

En la tabla 3.3 se muestra la importancia relativa de cada una de las necesidades identificadas durante el proceso realizado con la ayuda del ingeniero encargado del área de interés del CIF. Se observa que, como mínimo, las necesidades se identificaron como innecesarias pero deseadas, lo cual se tendrá en consideración en caso de requerir una disminución de costos en la eventual solución. La mayoría de las necesidades son indispensables porque

abarcen aquellos elementos que se necesitan solucionar con el proyecto, atendiendo las necesidades interpretadas de la entrevista.

3.2. Determinación de métricas y especificaciones

Posteriormente a la identificación de necesidades, la metodología continúa con la determinación de métricas, las cuales se utilizan como base para realizar el diseño del proyecto. En la tabla 3.4 se muestran las métricas determinadas en relación con las necesidades que cada una de ellas expresa en términos numéricos, binarios o subjetivos, así como las unidades de medición.

Para definir las especificaciones, fue necesario hacer uso de la información obtenida en la entrevista realizada, además de un análisis de la operación de toma de medidas con un dendrómetro.

Esto implica que, en el posterior proceso de validación del sistema, se pretende considerar las capacidades de medición como parámetros distintos a los medibles, mientras que los parámetros medibles deben encontrarse dentro de los rangos de aceptación.

Tabla 3.4: Métricas definidas para la ejecución del proyecto.

| Numero | Métrica | Importancia | Unidades |
|--------|---|-------------|--------------------------|
| 1 | El sistema es de uso intuitivo | 3 | Subjetivo |
| 2 | El sistema mide la disminución e incremento de diámetro | 5 | mm |
| 3 | El sistema mide variaciones de 1mm de diámetro | 5 | Binario |
| 4 | El sistema toma mediciones frecuentemente | 3 | h |
| 5 | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente | 5 | Factor de seguridad (fs) |
| 6 | El sistema no es invasivo | 4 | Binario |
| 7 | El sistema almacena la medición de las variaciones | 5 | dB |
| 8 | El sistema elimina las pérdidas de tiempo por el desplazamiento de los investigadores | 4 | Binario |

Con las métricas definidas, se procede a indicar los valores marginales e ideales de cada una de ellas en la tabla 3.5. Estos valores se basan en el nivel de importancia relativo y son una parte crucial del proyecto, ya que su cumplimiento determina, a su vez, el cumplimiento de los objetivos.

La primera especificación tiene un carácter subjetivo. Para esta, se plantea la siguiente escala, que deberá medirse bajo el criterio de uso de los individuos involucrados en la operación del sistema:

1. De uso muy complejo.
2. De uso complejo.

Tabla 3.5: Valores marginales e ideales para las métricas definidas.

| Numero | Métrica | Importancia | Unidades | Valor marginal | Valor ideal |
|--------|---|-------------|--------------------------|----------------|-------------|
| 1 | El sistema es de uso intuitivo | 3 | Subjetivo | 4 | 5 |
| 2 | El sistema mide la disminución e incremento de diámetro | 5 | mm | menor a 1 | 0.5 |
| 3 | El sistema mide variaciones de 1mm de diámetro | 5 | Binario | No cumple | Cumple |
| 4 | El sistema toma mediciones frecuentemente | 3 | h | menor a 3 | 1 |
| 5 | El sistema es capaz de trabajar en el medio ambiente | 5 | Factor de seguridad (fs) | mayor a 1.5 | mayor a 2 |
| 6 | El sistema no es invasivo | 4 | Binario | No cumple | Cumple |
| 7 | El sistema almacena la medición de las variaciones | 5 | dB | mayor a 10 | mayor a 15 |
| 8 | El sistema elimina las pérdidas de tiempo por el desplazamiento de los investigadores | 4 | Binario | No cumple | Cumple |

3. De uso con dificultad moderada.
4. De uso sencillo.
5. De uso muy sencillo.

Es importante rescatar de nuevo algunos de los requerimientos del proyecto para solucionar el problema presente en el CIF. Se necesita que el sistema a desarrollar tenga la capacidad de realizar mediciones de cambio de diámetro con respecto al tiempo con una tolerancia menor a 1 mm. También es crucial la prueba de funcionamiento de la plataforma de control a desarrollar, la cual se plantea que puede validar el funcionamiento de este subsistema, si es posible tener un SNR igual o mayor a 15 dB. Por último, es esencial diseñar piezas robustas para que puedan operar en el medio ambiente, por lo que se pretende que los puntos críticos del mecanismo se analicen y su factor de seguridad sea mayor a 2, lo cual asegura un sistema robusto.

3.3. Descomposición funcional del problema

3.3.1. Entradas y salidas

Para el sistema a desarrollar, se tiene una entrada y una salida. La entrada corresponde a la señal del sensor a utilizar, la cual representa la medida detectada del dendrómetro manual en una variable física. La señal de salida corresponde a la información almacenada, ya traducida en función de la distancia. Este dato corresponde a la medida del cambio que hubo de desplazamiento en el tiempo. La figura 3.1 muestra un bloque con la entrada y la salida de forma general.

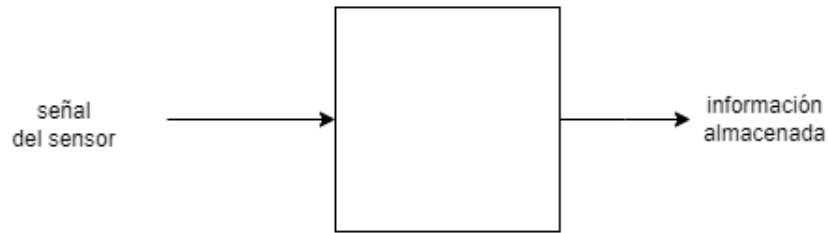


Figura 3.1: Diagrama de bloques de entradas y salidas.

3.3.2. Definición de subsistemas

Teniendo en cuenta el diagrama general, es posible plantear un conjunto de subsistemas para el desarrollo de la solución. Esto se hace con el objetivo de segmentarla y obtener problemas de menor dificultad que puedan ser resueltos individualmente. La figura 3.2 muestra el diagrama de bloques donde se ilustran los subsistemas a desarrollar.

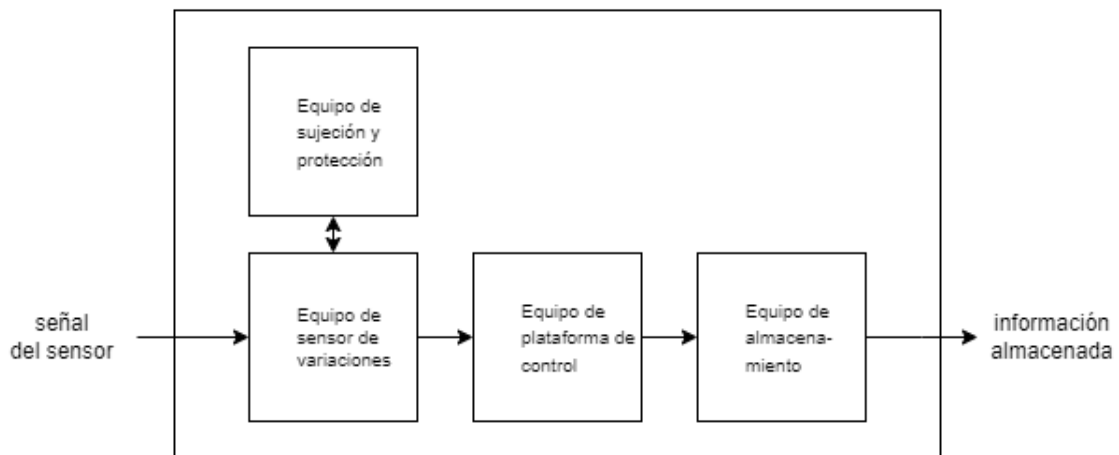


Figura 3.2: Diagrama de subsistemas

Equipo de sensor de variaciones

Este componente del sistema corresponde al equipo que será capaz de detectar las variaciones de diámetro que tiene el árbol. Es fundamental tener en cuenta la importancia dada por el cliente de que sea capaz de trabajar en el medio ambiente y sea preciso.

Equipo de plataforma de control

El equipo de plataforma de control corresponde al cerebro del sistema y es el encargado de la toma de decisiones y ejecución de estas. Este equipo debe ser capaz de alimentar al sensor, obtener la medida de este y traducirla en distancia. Debido a la naturaleza del problema, es necesario utilizar una plataforma de control pequeña.

Equipo de almacenamiento

Este equipo se encarga de almacenar la información extraída por la plataforma de control.

Equipo de sujeción y protección

Este componente del sistema corresponde al equipo que ajusta el sensor con la plataforma de control, además de funcionar como equipo de protección para los componentes.

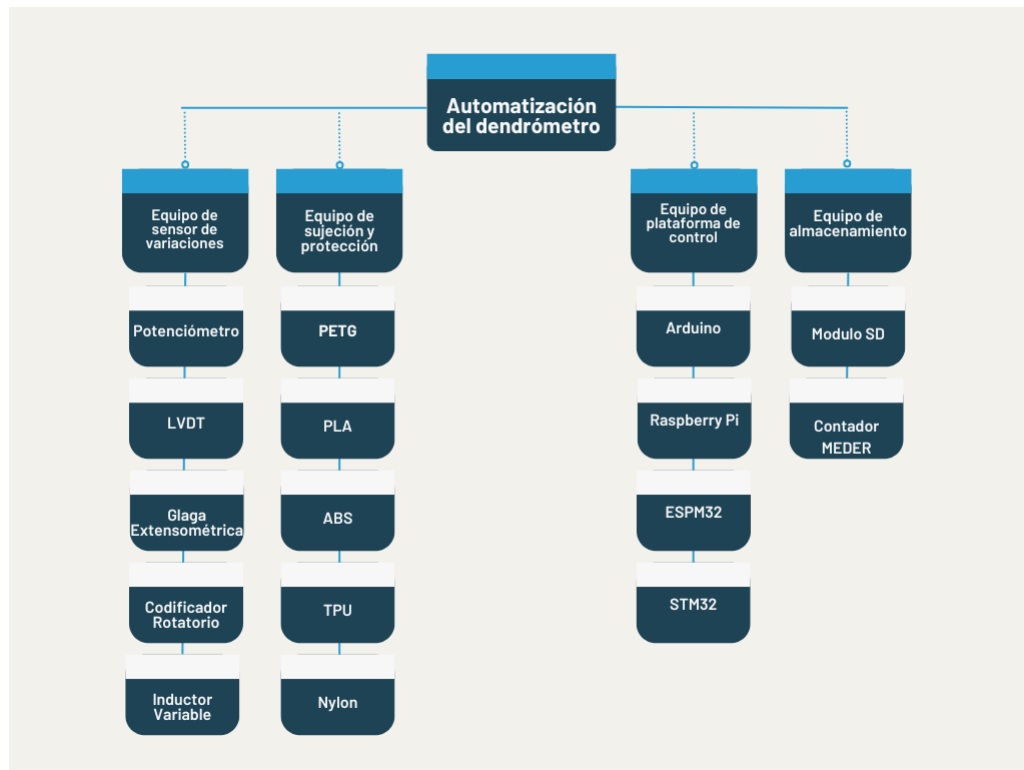


Figura 3.3: Plantilla para el proceso de combinación de los conceptos a evaluar

3.4. Generación de conceptos

Para esta sección del proyecto, se generan múltiples conceptos de solución basados en la investigación interna y externa de la metodología. Se ha consultado documentación académica y se han tenido conversaciones con los ingenieros del área del CIF para plantear posibles soluciones, teniendo en cuenta las necesidades y los subproblemas de la descomposición funcional. A continuación, se detallan las posibles soluciones:

Para presentar un panorama general de los subproblemas y las diversas soluciones que se pueden dar a cada uno de estos, se presenta en la figura 3.3 una síntesis de las opciones.

3.4.1. Concepto 1

El primer concepto generado implica el uso de una galga extensiométrica, para lo cual se emplea un dendrómetro de punto para medir la presión ejercida. El material de impresión 3D seleccionado es PTEG, mientras que la plataforma de control consiste en una Raspberry Pi y el equipo de almacenamiento se basa en el módulo SD.

La figura 3.4 ilustra la combinación seleccionada para la generación del Concepto 1. Además, la figura 3.5 presenta un esquema general de conexión de la combinación, destinado únicamente con fines ilustrativos.

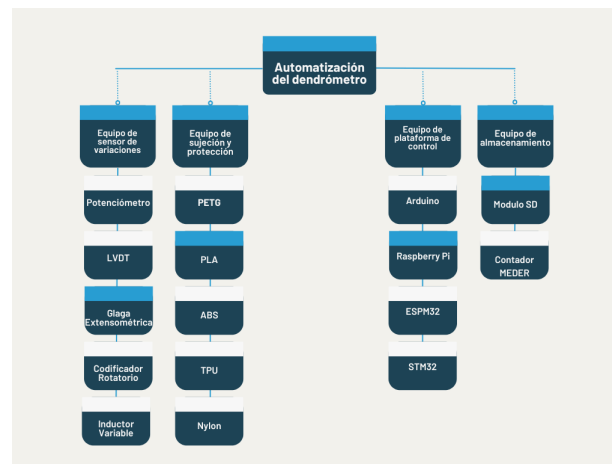


Figura 3.4: Concepto 1

3.4.2. Concepto 2

El segundo concepto implica la utilización de un potenciómetro, para lo cual se empleará un dendrómetro de banda. Este dendrómetro de banda medirá la distancia a través del

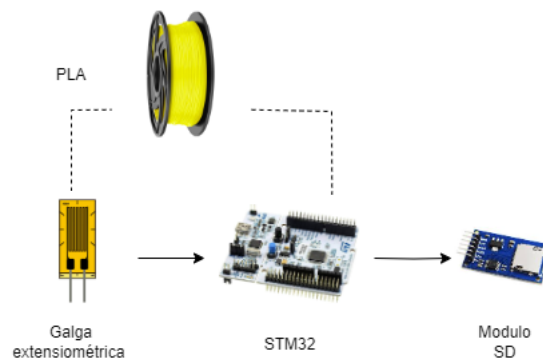


Figura 3.5: Esquema general de conexión del concepto 1

eje del potenciómetro. El material de impresión 3D seleccionado es PETG, y al igual que en el primer concepto, la plataforma de control es Arduino y el equipo de almacenamiento se basa en el módulo SD.

La figura 3.6 muestra la combinación seleccionada para la generación del Concepto 2. Asimismo, la figura 3.7 presenta un esquema general de conexión de la combinación, destinado únicamente con fines ilustrativos.

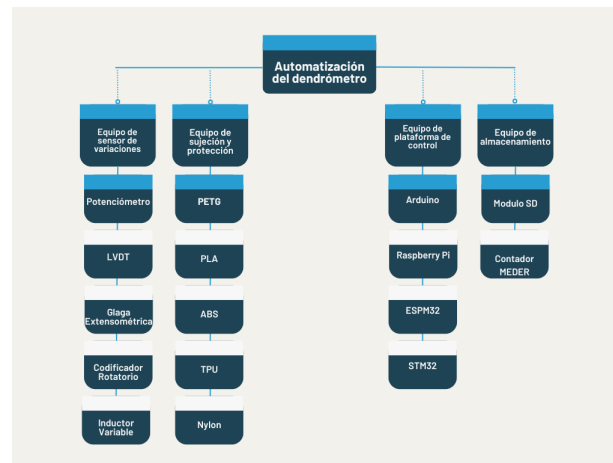


Figura 3.6: Concepto 2

3.4.3. Concepto 3

El tercer concepto de solución planteado implica la utilización de un codificador rotatorio. Al igual que en el concepto 2, se propone emplear un dendrómetro de banda. El material de impresión 3D seleccionado es PETG. Sin embargo, en este caso, la plataforma de control es STM32, y el equipo de almacenamiento consiste en el módulo SD.

La figura 3.8 muestra la combinación seleccionada para la generación del Concepto 3.

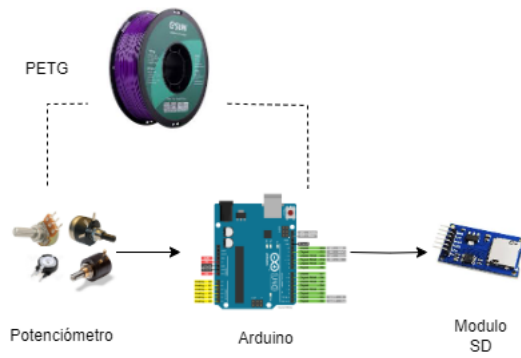


Figura 3.7: Esquema general de conexión del concepto 2

Asimismo, la figura 3.9 presenta un esquema general de conexión de la combinación, destinado únicamente con fines ilustrativos.

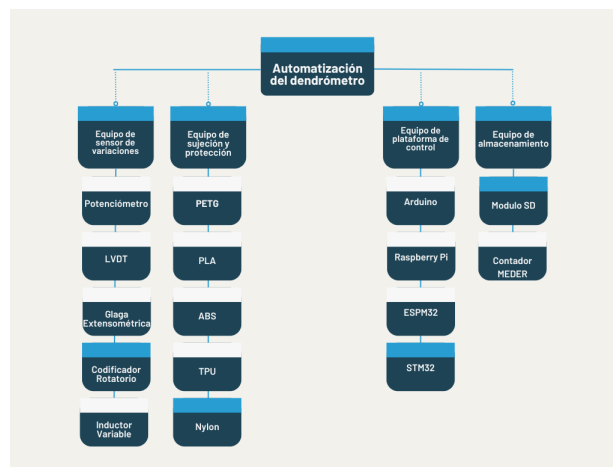


Figura 3.8: Concepto 3

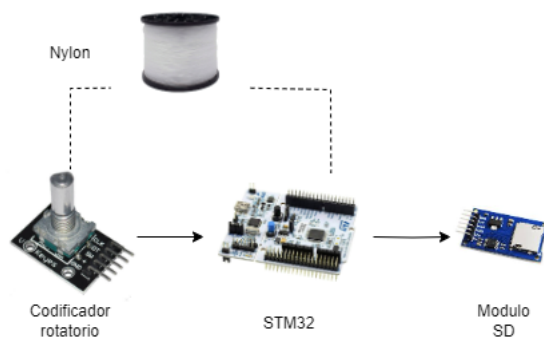


Figura 3.9: Esquema general de conexión del concepto 3

3.5. Evaluación de conceptos

3.5.1. Criterios de selección de conceptos

En esta sección se presenta un conjunto de criterios de selección para la evaluación de los conceptos, donde se definirán los puntos fuertes y débiles de cada uno, con el fin de realizar una selección final. La tabla 3.6 muestra los criterios de selección identificados, basados en la jerarquización de necesidades.

Tabla 3.6: Criterios para la selección de conceptos.

| Número | Criterio de selección | Descripción | Peso |
|--------|-------------------------------|--|------|
| 1 | Facilidad de uso | Referente a la introducción de instrucciones de control por parte de un operario y monitorización del sistema. | 15 % |
| 2 | Resistencia al medio ambiente | Se refiere a las herramientas y protección que brinda el sistema para cumplir sus funciones en un ambiente no controlado | 30 % |
| 3 | Costo | Costo general de la implementación del proyecto | 15 % |
| 4 | Confiabilidad | Calidad del equipo en implementación, considerando la durabilidad de materiales. | 25 % |
| 5 | Facilidad de implementación | Referente a la facilidad de instalar el sistema posterior a la etapa de diseño. | 15 % |

3.5.2. Evaluación de conceptos

Con los criterios de selección identificados, se procede a realizar la evaluación de los conceptos generados en la etapa de Generación de Conceptos. A cada uno de estos se les asigna un valor relativo a los criterios de selección de la tabla 3.6, según su grado de cumplimiento. Posteriormente, se les otorga una calificación ponderada basada en el porcentaje de peso de cada factor y el valor asignado a cada uno de los factores.

La tabla 3.7 recopila los criterios de selección y genera la evaluación de los conceptos. Cada uno de estos conceptos cuenta con una calificación y una evaluación. La calificación se basa en una escala del 1 al 5, donde cada valor se interpreta de la siguiente manera:

1. No se cumple con el criterio
2. Cumplimiento mínimo del criterio
3. Cumplimiento regular del criterio
4. Cumplimiento adecuado del criterio
5. Cumplimiento a cabalidad del criterio

Con estas calificaciones se asigna el porcentaje de cada criterio, que al final sumará el porcentaje de cumplimiento general del concepto. Con los resultados obtenidos, se seleccionará el concepto con mayor valor, basándose en un análisis de los resultados.

Tabla 3.7: Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos.

| Criterios de selección | Peso | Concepto 1 | | Concepto 2 | | Concepto 3 | |
|-------------------------------|-----------|-----------------------|------------|---------------|------------|-----------------------|------------|
| | | Galga extensiométrica | | Potenciómetro | | Codificador rotatorio | |
| | | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación |
| Facilidad de uso | 15 % | 3 | 0.45 | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 |
| Resistencia al medio ambiente | 30 % | 3 | 0.9 | 4 | 1.2 | 3 | 0.9 |
| Costo | 15 % | 4 | 0.6 | 5 | 0.75 | 3 | 0.45 |
| Confiabilidad | 25 % | 3 | 0.75 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| Facilidad de implementación | 15 % | 4 | 0.6 | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 |
| | Total | 3.3 | | 4.45 | | 3.85 | |
| | Lugar | 3 | | 1 | | 2 | |
| | Continuar | No | | Desarrollar | | No | |

En la tabla 3.7 se puede observar que el concepto basado en el potenciómetro tienen un rendimiento superior. También se nota que los otros dos conceptos fallan en métricas cruciales para el proyecto. Como resultado de la evaluación de los conceptos, se determinó que la opción a desarrollar es el Concepto 2, ya que presenta una solución ideal en términos de confiabilidad y seguridad.

3.6. Propuesta de concepto de solución

Finalmente, para esta etapa de la metodología, se presenta el esquema de la figura 3.10, el cual muestra un diagrama representativo del concepto de solución propuesto. Este esquema está compuesto por los siguientes elementos:

- Dendrómetro manual
- Sensor
- Encapsulado y sujetador
- Plataforma de control
- Módulo de almacenamiento

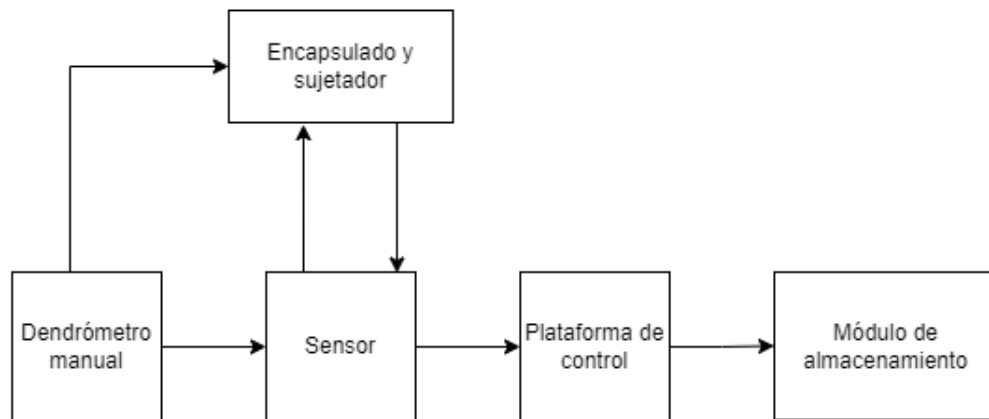


Figura 3.10: Concepto Solución

Capítulo 4

Sistema de medición de diámetro de arboles

En este capítulo se presentan las etapas que forman parte del proceso de diseño del sistema de medición del diámetro de los árboles, cuyo objetivo es estudiar la relación entre el crecimiento de los árboles y las precipitaciones. Esta fase del proyecto se divide en tres grandes grupos: el sistema de medición mediante un sensor, el hardware del sistema y el sistema de interpretación y almacenamiento de datos.

En lo que respecta al sistema de medición, se proporciona una visión general de los componentes eléctricos seleccionados para implementar el sistema, los cuales fueron elegidos por su funcionalidad y disponibilidad para integrarse al sistema. En cuanto al hardware, se hace referencia a el encapsulado del dispositivo y a la sujeción del sensor al dendrómetro, los cuales deben ser capaces de proteger al sistema de diferentes condiciones climáticas.

En cuanto al software, se detallan los algoritmos encargados de interpretar los datos obtenidos por el sistema a partir del dendrómetro, así como de almacenarlos para su posterior extracción. En términos generales, estas etapas comprenden la solución al problema planteado, lo cual implica la captación de datos mediante sensores y la capacidad del sistema para interpretar y almacenar dichos datos. Todo esto debe ser capaz de funcionar eficazmente en diferentes condiciones climáticas.

4.1. Dendrómetro

El dendrómetro seleccionado para este proyecto será un dendrómetro de banda. La principal razón detrás de esta elección es que el dendrómetro de banda no interferirá de ninguna

manera con el árbol. En contraste, el uso de un dendrómetro de punto requeriría perforar el árbol para su fijación. La decisión de optar por el dendrómetro de banda se basó en la consulta con un experto, el Ingeniero Dorian Carvajal, colaborador del CIF. Nuestro objetivo es minimizar al máximo cualquier interferencia con el árbol, por lo que el dendrómetro de banda sujetará el sensor seleccionado utilizando un encapsulado diseñada específicamente para este propósito. De esta manera, la misma tensión que mantiene en su lugar al dendrómetro de banda también asegurará el dispositivo de medición.

La elección de este dendrómetro sobre el dendrómetro de punto se debe a que este tipo puede utilizarse en tallos mayores a 5 cm y no tiene un límite máximo de medida, ya que se puede fabricar con la longitud deseada. Las bandas son reutilizables y fáciles de instalar. Por último, e importante, ofrecen una excelente estabilidad contra el viento, ya que generan poca resistencia y son resistentes a caídas de ramas pequeñas o frutos.

Se utilizó el dendrómetro D1 Dendrometer del fabricante Meter. Este dendrómetro está hecho de un material de baja fricción y baja expansión térmica, gracias al plástico Astralon del cual está compuesto. El dendrómetro D1 presenta un Vernier con poca fricción para tomar datos más precisos. Es importante mencionar que esta sección del dispositivo tiene la mayor sección transversal, por lo tanto, es también la más resistente. Además, el fabricante asegura que los agujeros del dendrómetro no presentan imperfecciones, lo que reduce la fricción al mínimo. Como se mencionó anteriormente, no importa el tamaño del árbol, ya que este dendrómetro puede ser alargado al unir otro dendrómetro del mismo tipo. Este dendrómetro de banda será la base para el proyecto, a partir del cual se decidirá qué potenciómetro se seleccionará, además de ser la base del diseño del sujetador y las piezas mecánicas.

4.2. Selección de sensor

Se analizaron diversas características de los sensores, centrándonos en su rendimiento y su idoneidad para encontrar una solución que se ajuste a las necesidades del proyecto. Se consideraron características indispensables, como la capacidad de obtener un rango de medida adecuado, al identificar los sensores que podrían cumplir con los requisitos establecidos. Las características evaluadas incluyen:

- Precio y tiempo de adquisición: Esta característica se refiere a la necesidad de que el sensor seleccionado tenga un costo accesible. Dado que el proyecto tiene como objetivo la replicabilidad y la creación de múltiples dispositivos similares, es fundamental

que el sensor sea económico. Además, esta característica incluye la disponibilidad del sensor en el mercado, ya que contamos con un tiempo limitado para la adquisición.

- Ecuaciones de Diseño: Esta característica se refiere a la existencia de un marco teórico que respalde el funcionamiento del sensor y permita modelar cómo se relacionan sus parámetros de diseño.
- Rugosidad: Esta característica se refiere a las dificultades que debe afrontar para lograr el funcionamiento del dispositivo en el medio ambiente, lo cual incluye los desafíos relacionados con el diseño mecánico.
- Calibración y mantenimiento: Esta característica se refiere a la necesidad de calibración y mantenimiento una vez puesto en funcionamiento. Al tratarse de un instrumento de precisión que se busca funcione de forma desatendida durante un largo período, se pretende que sea estable y opere sin necesidad de intervenciones frecuentes.

4.2.1. Evaluación del Sensor seleccionado

Utilizando la metodología de Ulrich Epinger, se evalúan y clasifican los posibles sensores para el proyecto mediante una matriz comparativa. En esta matriz, se compara los sensores en función de las características evaluadas, que incluyen precio y tiempo de adquisición, diseño, rugosidad y consumo.

Tabla 4.1: Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos

| | | Concepto 1 | | Concepto 2 | | Concepto 3 | |
|-------------------------------|------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | | CTS 026 | | Bourns 3590 | | PAM8403 | |
| Criterios de selección | Peso | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación | Calificación | Evaluación |
| Precio y tiempo de obtenerlos | 20 % | 3 | 0.6 | 4 | 0.8 | 3 | 0.6 |
| Ecuaciones de diseño | 20 % | 4 | 0.8 | 4 | 0.8 | 4 | 0.8 |
| Rugosidad | 30 % | 3 | 0.9 | 5 | 1.5 | 3 | 0.9 |
| Calibración y mantenimiento | 30 % | 5 | 1.5 | 5 | 1.5 | 3 | 0.9 |
| Total | | 3.8 | | 4.6 | | 3.2 | |
| Lugar | | 2 | | 1 | | 3 | |
| Continuar | | No | | Si | | No | |

Como potenciómetro ganador, se ha seleccionado específicamente el potenciómetro Bourns serie 3590S. Este sensor cuenta hasta con una certificación de IP65. Entre los beneficios de este potenciómetro en comparación con el codificador rotatorio, se destaca que puede ser alimentado con una magnitud menor y su precio es más accesible. Es importante mencionar que, aunque el precio de los potenciómetros puede ser más elevado, se justifica

por la necesidad de una protección adicional. En este proyecto, es crucial contar con una protección extra y la capacidad de funcionar en diversas condiciones climáticas, lo cual no sería posible con un codificador sin ningún tipo de protección. Por lo tanto, el potenciómetro Bourns serie 3590S se adapta a las exigencias y necesidades del proyecto.

4.2.2. Sensor de medición

Se ha seleccionado el potenciómetro Bourns de 10 k Ω de la serie 3590S - Precision Potentiometer debido a su capacidad para satisfacer los requisitos generales del proyecto, así como los previamente establecidos en el capítulo anterior. Sus características son las siguientes:

- Resistencia total: 10 k Ω
- Tolerancia de resistencia: 5 %
- No linealidad: 0.25 %
- Ángulo eléctrico efectivo: 3600° +10°, -0°
- Temperatura de operación: [-40C°, +125C°]

La linealidad se define como la relación entre la resistencia de salida y la rotación mecánica del eje. En el caso de este potenciómetro, opera bajo el principio de linealidad independiente, que es la forma más común de describir esta característica debido a que ofrece una tolerancia más baja a un costo razonable. La linealidad independiente se refiere a la máxima desviación permisible de la curva de salida con respecto a una línea de referencia. La pendiente y la posición de esta línea de referencia se eligen para minimizar las desviaciones en todo o en una parte del recorrido eléctrico real. Se coloca la línea de referencia de manera que se ajuste mejor a través de la curva de salida real, como se observa en la ilustración 4.1.

Adicionalmente, los rangos de temperatura en los que el potenciómetro puede operar sin afectar su tolerancia son lo suficientemente amplios como para abarcar las variaciones climáticas presentes en diferentes regiones del país, independientemente del lugar de estudio. Esto significa que, según la ficha de información proporcionada por el fabricante, la tolerancia de la resistencia del potenciómetro se mantendrá constante, asegurando un rendimiento confiable incluso en condiciones ambientales variables.

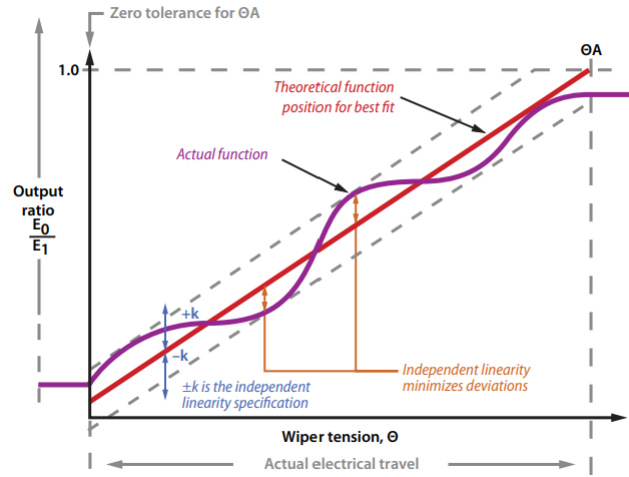


Figura 4.1: Comportamiento de linealidad del sensor [37]

Método 1

Debido a que se trata de un potenciómetro rotatorio lineal, existe una relación entre la resistencia R_1 y R_{Total} la posición del contacto móvil. Esta relación se describe en la ecuación 4.1.

$$R_1 = \frac{a}{2\pi * 10} * R_{tot} \quad (4.1)$$

Se utilizará la banda del dendrómetro de plástico para traccionar el eje del potenciómetro. De esta manera, al enrollar el dendrómetro alrededor del tronco del árbol, el potenciómetro rotará al variar el perímetro del tronco, como se muestra en la figura .

La dependencia entre el desplazamiento de la cinta (d) y el ángulo recorrido (α) y el radio de tracción del potenciómetro (r) está dada por la ecuación 4.2.

$$d = r * \alpha \quad (4.2)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene la ecuación 4.3.

$$d = r * \frac{R_1}{R_{tot}} * 20\pi \quad (4.3)$$

En base a esta ecuación, se observa que el desplazamiento d es proporcional a R_1 . Por lo tanto, es posible medir d indirectamente midiendo R_1 utilizando el método de divisor resistivo.

De esta ecuación, d es proporcional a R_1 . Por lo tanto, se puede medir d indirectamente midiendo R_1 utilizando el método del divisor resistivo. Teniendo en cuenta la tensión de alimentación del potenciómetro, al digitalizar los datos, se puede utilizar la siguiente ecuación para obtener el dato en términos de resistencia.

$$R_1 = \frac{\text{Voltaje}}{2^{\text{bitsADC}} - 1} \quad (4.4)$$

Método 2

También, se puede calcular un divisor de voltaje, el cual se va a medir en la patilla de la resistencia variable, que en este caso la llamaremos R_1 . Para ello, se utiliza la fórmula del divisor de voltaje 4.5, esto indica la caída de voltaje en R_1 . Esto permite determinar la diferencia de voltaje cada vez que se mueva la perilla del potenciómetro.

$$V_{\text{Salida}} = V_{\text{Entrada}} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.5)$$

Este método, a diferencia del anterior, requerirá un proceso de calibración diferente, es necesario encontrar la relación entre el desplazamiento y el voltaje. Este ajuste permite establecer una correspondencia precisa entre la posición de la perilla del potenciómetro y el voltaje medido en la patilla de la resistencia variable.

Se seleccionará el método que demuestre mejor rendimiento, prestando especial atención a la resolución que mejor se adapte para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo automatizado.

4.3. Encapsulado y protección del sensor

En esta sección del capítulo, se describe el desarrollo del mecanismo de agarre y protección del sensor que se utilizó en el proyecto. Se presenta el diseño de las piezas involucradas, junto con sus dimensiones, lo que permite resaltar la relación entre el sistema de medición, el sensor elegido y el mecanismo de agarre.

4.3.1. Diseño del sujetador

El mecanismo de agarre propuesto difiere de los dendrómetros comerciales. Consiste en un brazo que se fija en la sección más resistente del dendrómetro de banda, donde se

encuentra el vernier. La parte plana del brazo sujeta perpendicularmente al tronco, lo que permite que la tensión del dendrómetro mantenga el mecanismo de agarre en su lugar. Además, se diseña una pieza cilíndrica que actúa como eje de tracción. Esta pieza se coloca en el eje del potenciómetro y hace contacto con el dendrómetro.

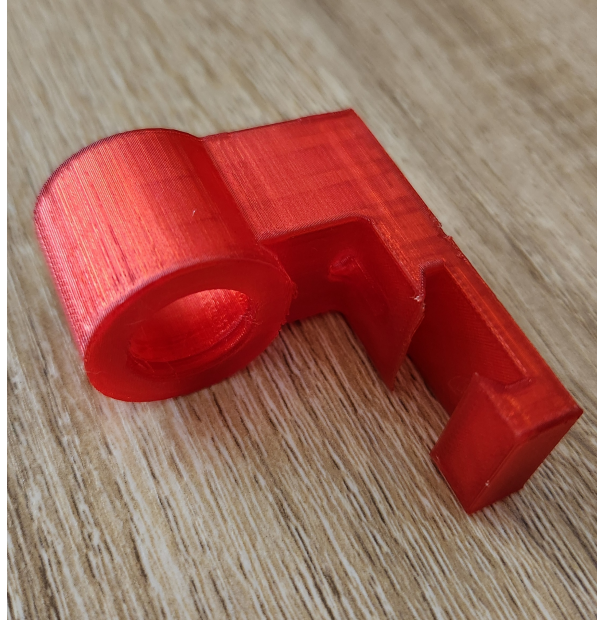


Figura 4.2: Sujetador

El crecimiento del diámetro del tronco tira de la cinta del dendrómetro, como es habitual. A través del mecanismo de tracción, esta acción mueve el eje del potenciómetro. Cuando el perímetro disminuye, el mecanismo de tracción permite que el eje del potenciómetro gire en la dirección opuesta. De esta manera, se obtiene un dendrómetro capaz de medir tanto el aumento como la disminución del diámetro del árbol en estudio.

Debido al espesor del brazo sujetador, es importante tenerlo en cuenta al realizar las mediciones. Esto se abordará en la sección de digitalización de los datos recopilados, de modo que el espesor del brazo no se incluya como parte del diámetro del árbol.

El material a utilizar debe seleccionarse de manera que la medición no se vea afectada por factores como la temperatura y la humedad. Para el sujetador, se seleccionó el material PETG para impresión 3D. Como se observa en la tabla comparativa de filamentos, el material elegido presenta ventajas sobre otros filamentos. La relación precio-calidad es un punto importante, además de que es capaz de trabajar a temperaturas menores a 80°C antes de sufrir deformación, lo cual es adecuado para trabajar en cualquier zona del país.

Las dimensiones del mecanismo deben ser adecuadas para garantizar la sensibilidad requerida y abarcar un rango suficiente para las mediciones. Estos detalles de diseño se

desarrollan en esta sección.

Existe un fuerte vínculo entre el tipo de sensor elegido y el mecanismo encargado de sujetarlo y protegerlo. Se ha diseñado un mecanismo sencillo para minimizar los efectos de las no idealidades del sistema mecánico, como las fricciones estáticas. La precisión en la implementación de estas piezas, con las herramientas disponibles, se encuentra en el mismo orden de magnitud que los desplazamientos que se pretenden medir.



Figura 4.3: Agujero de tapa para saliente de cable

El mecanismo fue diseñado teniendo en cuenta que el sensor es un potenciómetro lineal cilíndrico, del cual se toma como señal la tensión de salida del divisor resistivo formado en el contacto móvil. Debido a esto, se tomaron decisiones importantes al diseñar el sujetador, como la inclusión de un espacio para realizar estas conexiones. Para evitar influir en la medición, los cables salientes del sensor dirigieron hacia la parte superior del mecanismo, la cual va a tener una tapa con un agujero para la salida de alimentación como se muestra en la ilustración 4.3. Además, se tomó la decisión de realizar un agujero en el mecanismo para evitar la acumulación de líquidos en caso de lluvia o derrames sobre el sujetador como se muestra en la figura 4.4.

4.3.2. Encapsulado

El objetivo del encapsulado esencialmente es proteger el sistema de la lluvia, la humedad, la radiación solar e insectos, sin interferir con el mecanismo de medición ni dañar el tronco del árbol. Aunque las dimensiones no son estrictas, se busca minimizar el tamaño

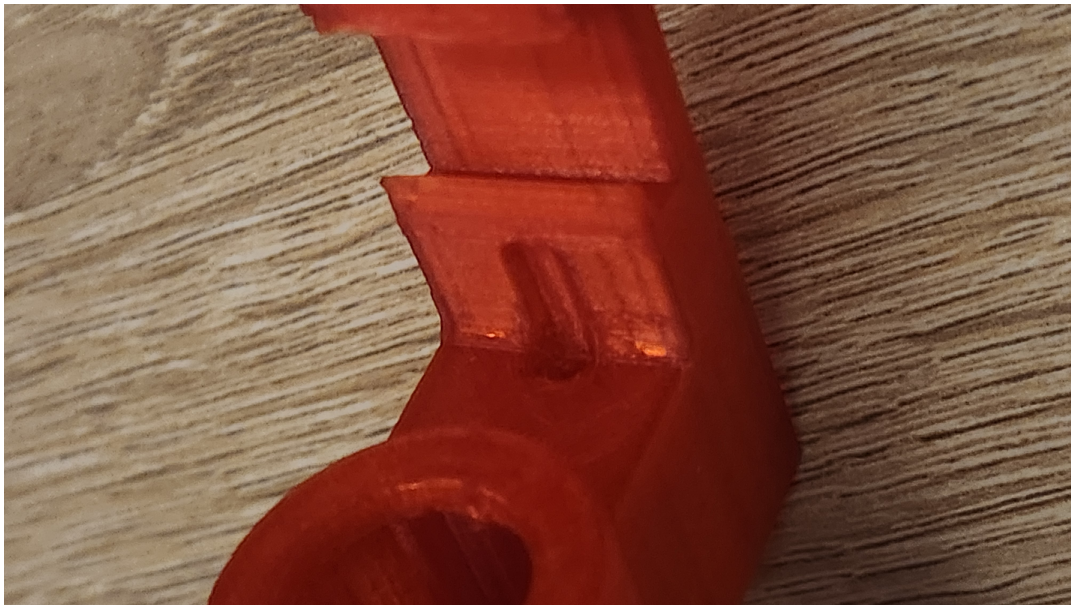


Figura 4.4: Acercamiento de agujero de carcasa

del instrumento y hacerlo ligero.

El diseño considera la capacidad de incorporar tanto el microcontrolador como la alimentación del sistema. Esta elección resulta adecuada para situaciones en las que se desee agregar sensores adicionales al sistema.



Figura 4.5: Encapsulado

Para el proyecto, se utilizó la carcasa de una micro estación del fabricante HOBO. Esta carcasa proporciona protección a la circuitería contra polvo, humedad y otros agentes externos, según lo asegurado por el fabricante. El material plástico con el que está fabricada es de alta resistencia. Utilizar esta carcasa para la circuitería del proyecto es un beneficio, dado que su propósito original es para aplicaciones meteorológicas.

Además, esta carcasa facilita la entrada y salida de cables, así como la sujeción de los componentes que necesitemos agregar a ella.

4.4. Selección del microcontrolador

Los requerimientos funcionales para cumplir por el software del microcontrolador son los siguientes:

- Función de ADC, para traducir la señal del sensor.
- Adquirir la señal del sensor digitalizada cada cierto tiempo.
- Controlar la tensión de alimentación del sensor.
- Almacenar la información en una memoria

Se analizaron diversas características de los microcontroladores estudiados. Se consideraron características indispensables.

- Tamaño y manejo: Esta característica se refiere a la necesidad de que el microcontrolador seleccionado tenga un tamaño reducido, dado que el proyecto cuenta con poco espacio para agrupar todos los dispositivos sensibles a la lluvia y el polvo.
- Precio y tiempo de adquisición: Esta característica se refiere a la necesidad de tener un costo accesible. Además, incluye la disponibilidad del microcontrolador, dado que se cuenta con un tiempo limitado para la adquisición.
- Capacidad de prototipado: Se refiere a la capacidad de adaptar fácilmente el microcontrolador a la estructura física del proyecto, así como a la facilidad de manejo del mismo.

4.4.1. Evaluación del microcontrolador seleccionado

Se utilizó la metodología Ulrich Epinger para evaluar y clasificar las posibles tarjetas que ofrece Arduino, que es el tipo de microcontrolador seleccionado anteriormente. En esta matriz, se comparan los sensores en función de las características evaluadas.

Tabla 4.2: Calificación de cumplimiento de criterios y evaluación de conceptos

| Criterios de seleccion | Peso | Arduino UNO | | Arduino Mega 2560 | | Arduino Nano | |
|--------------------------------|------|--------------|----------------------|-------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | | Calificacion | Evaluacion ponderada | Calificacion | Evaluacion ponderada | Calificacion | Evaluacion ponderada |
| Tamaño y manejo | 30 % | 5 | 1.5 | 2 | 0.6 | 5 | 1.5 |
| Precio y tiempo de adquisicion | 30 % | 5 | 1.5 | 2 | 0.6 | 2 | 0.6 |
| Capacidad de prototipado | 40 % | 4 | 1.6 | 3 | 1.2 | 5 | 2 |
| Total de puntos | | 4.6 | | 2.4 | | 4.1 | |
| Lugar | | 1 | | 3 | | 2 | |
| Continuar? | | Si | | No | | No | |

Como microcontrolador ganador, se seleccionó el Arduino UNO, como se observa en la figura 4.2. Este microcontrolador cuenta con 14 pines digitales y 6 pines analógicos. Se puede alimentar con una batería dentro de un rango de 7 a 12 V. Físicamente es muy ligero, pesa aproximadamente 25 g y mide 6.86x5.43 cm. Estas características son beneficiosas para el proyecto, ya que la carcasa seleccionada es espaciosa, pero debe albergar varios dispositivos, por lo que el manejo del espacio es importante.

4.4.2. Digitalización de la medición

Con respecto a la digitalización de la medida tomada por el potenciómetro, se escogió el método 2 mencionado en la selección del sensor, el cual se basa en el principio de divisor de voltaje. Esto se debe a que la precisión que nos brinda el microcontrolador es mejor si utilizamos el voltaje como punto de referencia. Al utilizar el método 1, se obtuvo información importante, pero debido al potenciómetro seleccionado, los datos no fueron tan consecutivos como los datos percibidos con el método 2. Se procede a utilizar el método 2, ya que implica que los datos no van a estar tan distribuidos y se tiene un mayor detalle al traducir la medida a distancia.

Para la digitalización del dato analógico, se emplea el ADC de 10 bits que ofrece el Arduino UNO. Dado que el ADC es de 10 bits, se tiene un rango de 0 a 1023 (2^{10}), lo cual proporciona la precisión adecuada para nuestro proyecto. Debido a que se utilizó la alimentación de 5V del Arduino, se normalizaron estos valores de 0 a 1023 a un rango de 0 a 5V. De esta manera, el dato que muestra el programa corresponde al valor del voltaje de salida del sistema o la variación en la patilla de la resistencia variable del potenciómetro.

Posteriormente a eso, se llevó a cabo la caracterización del sensor, para lo cual se estudiaron rangos de 1 mm hasta 1 cm. Se seleccionó este rango porque es la región en la que el dendrómetro mayormente estará operando. Aunque normalmente un árbol maduro no aumenta su diámetro considerablemente en un año, se optó por este rango para poder incluir árboles jóvenes que podrían experimentar un aumento de hasta 1 cm en poco tiempo [38].

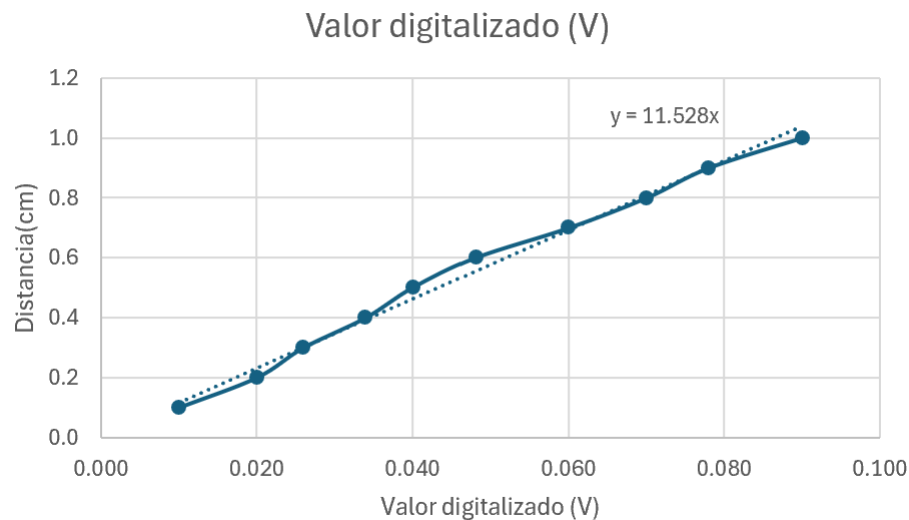


Figura 4.6: Recta de mejor ajuste para la digitalización de la medición

De esta manera, se procedió a analizar la recta de mejor ajuste que nos permitiera alcanzar la precisión deseada. Como se muestra en la figura 4.6, el coeficiente que multiplica el voltaje es de 11.528. Por lo tanto, nuestra ecuación quedaría de la siguiente manera 4.6.

$$y = 11,528x \quad (4.6)$$

Como se observa en la figura 4.6, la curva que describe el proceso de digitalización de la medida muestra un comportamiento similar al descrito por el fabricante del potenciómetro. Por lo tanto, utilizando la recta de mejor ajuste que se ha calculado, se puede aplicar a todos los rangos de medición.

4.4.3. Implementación del sistema de almacenamiento

Parte de la funcionalidad incluye la capacidad de respaldar los datos, y para este proyecto se ha elegido almacenar la información en una memoria flash, específicamente utilizando tarjetas de memoria flash o tarjetas SD. Algunas características destacadas de estas me-

morias incluyen su buena resistencia a los golpes debido a la ausencia de partes móviles, su bajo consumo energético, su reducido tamaño y peso. Además, otra característica importante para el proyecto es su capacidad para trabajar en temperaturas extremas, desde -25°C hasta 85°C .

Al iniciar la aplicación, la memoria guardó automáticamente los datos de la medición junto con el tiempo en que se realizó la medición. Esto permitió tener la interpretación del cambio de medida con respecto al tiempo, que es la función principal de un dendrómetro.

Dado que nuestra plataforma de control seleccionada es el Arduino UNO, se optó por un módulo de tarjeta SD que resulta perfecto para el proyecto debido a su reducido tamaño y su compatibilidad con el Arduino UNO.

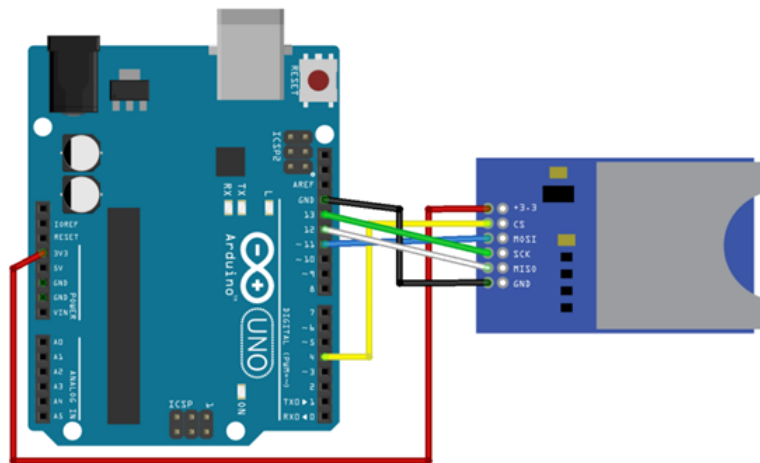


Figura 4.7: Diagrama de conexión del Módulo SD

Para la conexión, puedes consultar la Figura 4.7. Para llevar a cabo la operación de almacenamiento de la información, el módulo SD tiene tres pines clave:

- VCC: Este pin proporciona energía y se conecta al pin de 3,3V del Arduino UNO.
- GND: Este pin se conecta a tierra.
- MISO (Master In Slave Out): Es la salida SPI del módulo de la tarjeta SD.
- MOSI (Master Out Slave In): Es la entrada SPI del módulo de la tarjeta SD.
- SCK (Reloj Serie): Este pin acepta los pulsos del reloj maestro (en nuestro caso, el Arduino UNO) para sincronizar la transmisión de datos.
- CS (Selección de Chip): Este pin de control se utiliza para seleccionar uno o varios dispositivos esclavos en el bus SPI.

Antes de insertar la tarjeta SD en el módulo SD y conectarla al Arduino, es formatearla correctamente en el sistema de archivos FAT32. Este sistema de archivos es ampliamente utilizado para dispositivos de almacenamiento y sistemas de archivos.

4.4.4. Prototipo

Con todos los elementos del proyecto, se realizó la unión de todos los sistemas que componen el dendrómetro automatizado, primordialmente para realizar las validaciones correspondientes. Se probó uno de los puntos más importantes: si el dispositivo podía permanecer en un árbol como lo haría un dendrómetro de banda manual. Lo que observamos en la figura 4.8 es el dispositivo desarrollado, operando como lo haría en una investigación de campo. Teniendo esto en cuenta, se procedió a realizar las validaciones del proyecto, descritas en el siguiente capítulo.



Figura 4.8: Prototipo

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo, se enfocó en el análisis económico del proyecto, así como en la realización de pruebas para evaluar el funcionamiento de cada uno de los indicadores del mismo. Para ello, se procedió a validar las piezas mecánicas diseñadas, verificar el correcto funcionamiento de la plataforma de control seleccionada y, por último, se aseguró de que el prototipo cumpla con las especificaciones establecidas previamente.

5.1. Prototipo Inicial

Según la propuesta inicial del proyecto, el prototipo del sistema consta de un sensor, que en este caso es un potenciómetro, el cual está asegurado mediante una pieza mecánica diseñada específicamente para este propósito. El potenciómetro se conectó al microcontrolador Arduino UNO, que supervisa constantemente los cambios de caída de tensión del potenciómetro, además, el microcontrolador se usó como la alimentación de 5V del potenciómetro. Además, el microcontrolador se encarga de proporcionar energía al módulo de tarjeta SD y de almacenar los datos recopilados y traducidos en la tarjeta SD.

5.2. Pruebas de funcionamiento

Cada validación consta de uno o más experimentos, cuyos datos se analizan para evaluar su impacto en las características del proyecto. Para cada validación, se presenta una descripción de la motivación, el procedimiento, los resultados obtenidos y un análisis con conclusiones parciales. Además, se proporciona el código fuente necesario para llevar a cabo cada experimento, así como los archivos que contienen la información procesada.

5.2.1. Validación de piezas mecánicas diseñadas

En el proyecto, se propuso que las piezas mecánicas tengan un valor de seguridad de 2 o superior por las siguientes razones:

- Los sistemas mecánicos están sujetos a cargas variables y condiciones imprevistas durante su vida útil. Un factor de seguridad de 2 ayuda a compensar estas variaciones y garantizar que la pieza pueda soportar cargas inesperadas sin fallar.
- Al tratarse de piezas impresas en 3D, las variaciones en las propiedades de los materiales y en el proceso de impresión pueden afectar la integridad de la pieza. Un factor de seguridad de 2 ayuda a mitigar los efectos de estas incertidumbres.
- Con el uso repetido, las piezas mecánicas pueden experimentar fatiga y degradación, lo que reduce su resistencia con el tiempo. Un factor de seguridad de 2 proporciona un margen adicional para compensar este desgaste y garantizar la seguridad del sistema.
- Normativas como la ISO 13849 y la ISO 12100 en el ámbito industrial recomiendan o exigen el uso de factores de seguridad específicos para garantizar la fiabilidad y seguridad de los diseños mecánicos. Un factor de seguridad de 2 es comúnmente aceptado en muchos estándares.

Además, es importante destacar que no se optó por un factor de seguridad igual a 2, ya que un valor superior implicaría un uso ineficiente del material y un aumento en el costo del dispositivo.

Para validar el factor de seguridad, se utilizó la herramienta Inventor, donde se diseñaron las piezas. Esta herramienta resultó de gran ayuda, ya que nos permitió obtener información sobre los esfuerzos, deformaciones y el factor de seguridad de la pieza en su punto crítico, considerando las condiciones iniciales del peso del dispositivo. Para lograr esto, se establecieron los puntos fijos del sujetador, que son las partes que presentan restricciones de movimiento. Además, se definió la carga, que corresponde al peso del sensor y su ubicación, y por último, se estableció la dirección de la gravedad.

Mediante un análisis de elementos finitos, se calcularon las características de nuestra pieza, y los resultados fueron los siguientes:

Los datos obtenidos [5.3](#) confirman que se cumple con el requisito de un factor de seguridad de 2. Es importante destacar que la deformación experimentada por el dispositivo es casi despreciable, lo que no afectaría a la resolución o precisión del sistema.

Tabla 5.1: Resultados de simulación en Inventor

| Características | Resultados |
|------------------------|------------|
| Factor de Seguridad | 15 |
| Deformación en plano Y | <40 nm |
| Deformación en plano X | <9 nm |

El análisis anterior confirma que el dispositivo no va a presentar o experimentar deformaciones, dado que la carga a la que está expuesto no es lo suficientemente significativa como para alterar la estructura del sujetador, siendo el factor de seguridad obtenido es 7.5 veces mayor al requisito, el cual es un factor de seguridad recomendado para aplicaciones relacionadas.

De acuerdo con esta validación, se puede concluir que el rendimiento de las piezas mecánicas diseñadas es adecuado para la aplicación prevista, dado que durante el proceso de diseño se tomaron en cuenta tanto el peso como las cargas que podrían generar.

El análisis de elementos finitos realizado muestra varios criterios que fueron evaluados, revelando valores de esfuerzo muy bajos, deformaciones mínimas y un factor de seguridad altamente confiable. Esto indica que el diseño es robusto y seguro frente a las cargas aplicadas.

5.2.2. Funcionamiento de la plataforma de control

Para validar el correcto funcionamiento de la plataforma de control, se analizaron las fluctuaciones aleatorias en el voltaje, las cuales están asociadas al ruido presente en el equipo utilizado. Para ello, se estudiará la Relación Señal-Ruido (SNR), que describe la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido presente. Un SNR alto indica una señal fuerte en comparación con el ruido, lo que se considera beneficioso ya que permite distinguir claramente la señal del ruido. Por el contrario, un SNR bajo puede dificultar la interpretación de las mediciones realizadas.

En la industria forestal, el SNR es crucial para asegurar la precisión de la recolección y análisis de datos. Un SNR de 15dB se considera adecuado para aplicaciones de censo de datos, garantizando la precisión y confiabilidad de los mismos.

Se eligió 15dB como límite inferior del SNR por varias razones:

- Un SNR mayor asegura una clara distinción entre la señal y el ruido. Con 15dB de

SNR, la señal es aproximadamente 30 veces mayor que el ruido, lo que reduce la posibilidad de errores en la recolección de datos.

- Un SNR alto mejora la calidad de los datos al minimizar el impacto de la interferencia del sonido, especialmente en entornos naturales donde factores como el viento, el movimiento de la vegetación y la actividad animal pueden generar ruido en las mediciones.

Para las pruebas y la validación de este indicador, se estudiaron las fluctuaciones del voltaje en una medida establecida. Esto permitió analizar los cambios en el voltaje y establecer comparaciones con una referencia. Se recolectaron más de 300 datos del dispositivo, durante los cuales se estableció un voltaje promedio de 1.397 V. Este voltaje corresponde a un cilindro de 18 cm de circunferencia, como se muestra en la figura 5.1. Durante el periodo de recolección de datos, el dispositivo estuvo en funcionamiento continuo. Al mover la perilla del potenciómetro, se le hizo una marca a la perilla, al elemento de tracción y a la carcasa; esto sirve como referencia para tomar las mediciones. Se utilizó el dato de 1.397 V como referencia para futuras medidas. La explicación de esta acción radica en que el SNR es una relación del voltaje de la señal con respecto al voltaje del ruido. No se puede tomar la medida mínima del sistema, ya que es 0 V. Establecer el punto de referencia implica que la relación señal-ruido será constante en las mediciones futuras. Aunque es cierto que el valor de SNR puede aumentar o disminuir dependiendo de si el árbol aumenta o disminuye, el factor de SNR no presentó cambios significativos. Debido a la cantidad de rotaciones que el potenciómetro permite, las variaciones de resistencia son pequeñas y, por ende, los cambios de voltaje también lo son.

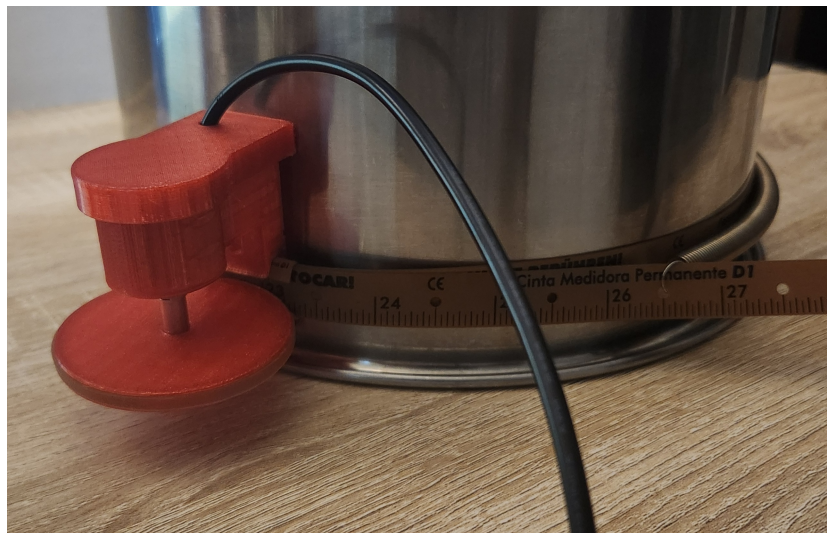


Figura 5.1: Validación del SNR del sistema

El ruido en este caso puede manifestarse como cualquier interferencia eléctrica o fluctuación aleatoria en la señal medida por el ADC del Arduino UNO. Para caracterizar este ruido a partir de múltiples muestras, se utilizó la desviación estándar. La desviación estándar es una medida de la variabilidad de los datos y puede ofrecer una estimación del nivel de ruido presente en el sistema.

Para calcular la Relación Señal-Ruido, se utiliza la fórmula 2.1, la cual se presenta en términos de voltaje.

$$vSNR = 20\log(1,397/0,029) \quad (5.1)$$

Con una señal promedio de 1.379 V, el ruido se ha determinado como la desviación estándar de los 304 datos recopilados, dando como resultado 0.029 V, como se muestra en la Tabla 5.2. Con esta información, podemos utilizar la siguiente fórmula 5.1, obteniendo como resultado 33.656 dB.

$$vSNR = 33,656dB \quad (5.2)$$

El resultado teórico ideal para la aplicación es un SNR de 15 dB. Los resultados obtenidos de la prueba de SNR son adecuados para los requerimientos del proyecto, ya que proporcionaron un SNR del doble de lo requerido.

Tabla 5.2: Resultados de toma de datos en un punto fijo

| Señal | Ruido |
|---------|---------|
| 1.397 V | 0.029 V |

Para este ensayo, se considera válido el funcionamiento de la plataforma de control. Una alta relación señal-ruido es deseable en muchas aplicaciones, ya que permite una transmisión de datos más confiable y una mejor calidad de señal en sistemas de comunicación.

5.2.3. Medición del cambio de diámetro

Para demostrar el funcionamiento del dispositivo, se fundamenta en la precisión de las mediciones del dendrómetro automatizado en relación con las mediciones exactas obtenidas del dendrómetro de banda; se espera que los cambios sean consistentes entre ambos. Con este propósito, se variaron las mediciones de un cilindro metálico de manera controlada, con el objetivo de lograr desplazamientos mínimos. Además, fue necesario desarrollar

un sistema que permitiera realizar estos pequeños desplazamientos y compararlos con las mediciones obtenidas del dendrómetro. Para ello, se fabricaron algunas piezas que permitieron ajustar el diámetro para cada medición, las cuales se pueden observar en la figura 5.2.



Figura 5.2: Calzas para aumento de diámetro para validación

El dispositivo de prueba consiste en un cilindro metálico al que se le añaden calzas calibradas de medidas específicas, fabricadas mediante impresión 3D. De esta manera, solo es necesario agregar las calzas al dendrómetro, lo que variará su desplazamiento, como se observa en la figura 5.3. Finalmente, se compara la información obtenida del dendrómetro analógico con la información recopilada por el dendrómetro automatizado.



Figura 5.3: Validación con calzas para estudio de diferentes diámetros

Para el proyecto, se requiere una tolerancia de ± 1 mm de diámetro. Por lo tanto, se fabricaron calzas de diferentes tamaños en los cuales el dendrómetro estará operando en el campo de investigación. Se consultó a un experto en el área, el profesor Dorian Carvajal, quien proporcionó información sobre los rangos en los cuales el dendrómetro

Tabla 5.3: Resultados de comparación de medidas manuales y mediciones del dispositivo automatizado

| Medida dendrometro manual | Medida obtenida | Delta | Desviación estándar | N |
|---------------------------|-----------------|-------|---------------------|-----|
| 0.100 | 0.088 | 0.012 | 0.025 | 81 |
| 0.500 | 0.477 | 0.023 | 0.030 | 84 |
| 1.000 | 0.961 | 0.039 | 0.008 | 75 |
| 1.200 | 1.178 | 0.022 | 0.014 | 77 |
| 1.800 | 1.765 | 0.035 | 0.023 | 82 |
| 2.400 | 2.388 | 0.012 | 0.024 | 83 |
| 2.700 | 2.679 | 0.021 | 0.025 | 101 |
| 3.000 | 2.989 | 0.011 | 0.007 | 81 |
| 3.700 | 3.643 | 0.057 | 0.024 | 83 |
| 4.000 | 3.918 | 0.082 | 0.025 | 88 |

debe operar, que van desde 1 mm hasta 4 cm. Como se mencionó anteriormente en la sección de digitalización del sensor, el dispositivo diseñado funcionará con árboles tanto jóvenes como maduros, por lo que tener un rango lo suficientemente amplio para estudiar ambos tipos de árboles es beneficioso. Por lo tanto, se decidió validar el funcionamiento en estos rangos, desde el más pequeño de 1 mm hasta el más grande de 4 cm. Además, se seleccionaron aleatoriamente varias magnitudes dentro de este rango para comprobar el correcto funcionamiento.

Para llevar a cabo las pruebas, se inició el programa y se ajustó el dendrómetro con las calzas diseñadas para obtener los diferentes cambios. Se recopilaron más de 70 datos por medida, y la información se capturó utilizando el sistema de almacenamiento. Posteriormente, se procedió a analizar los datos obtenidos.

Se promediaron los datos obtenidos para cada medición y se compararon con los valores proporcionados por el dendrómetro manual. Para ello, se calculó la diferencia entre la medida manual y la del dispositivo diseñado. A partir de esto, se determinó la desviación estándar de cada una de las mediciones, así como la cantidad de datos analizados por medición. Este paso es crucial, ya que para obtener la tolerancia del dispositivo es necesario calcular la desviación estándar combinada de todas las muestras. Los datos obtenidos se presentan en la tabla 5.3.

Para el análisis de los datos, se utiliza un nivel de confiabilidad del 95%. Este nivel se selecciona porque proporciona un equilibrio razonable entre la precisión de los resultados y la confianza en que esos resultados reflejen la verdadera población. El nivel de confianza

del 95 % es ampliamente aceptado en la investigación científica y en la toma de decisiones. Además, a nivel técnico, un nivel de confianza del 95 % se ha convertido en una norma comúnmente aceptada debido a su robustez y fiabilidad [39].

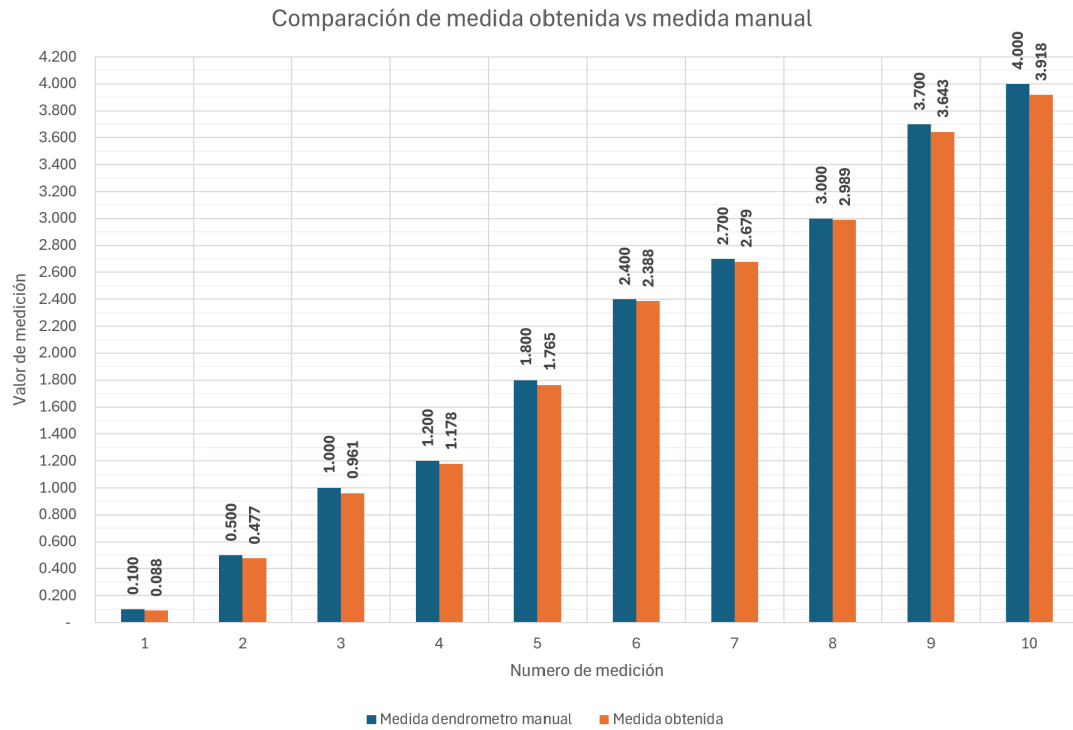


Figura 5.4: Representación gráfica de datos del dendrómetro manual y datos de dispositivo automatizado

Con el nivel de confiabilidad y la desviación estándar combinada de todas las muestras en cuenta, procedimos a calcular la tolerancia utilizando la fórmula 5.3.

$$T = k * \sigma \quad (5.3)$$

Donde:

- T es la tolerancia.
- k es el factor de tolerancia, determinado por el nivel de confianza.
- la desviación estándar combinada.

El factor de tolerancia k se obtuvo a partir de las tablas estadísticas para diferentes niveles de confianza y distribuciones de probabilidad. Para el nivel de confianza seleccionado del 95 % y una distribución normal, el valor de k es igual a 1.96.

Con esto podemos calcular la tolerancia.

$$T = 1,96 * 0,22 \quad (5.4)$$

$$T = 0,043cm \quad (5.5)$$

Esto indica que las mediciones realizadas por el dispositivo automatizado están dentro de ± 0.043 cm de las mediciones verdaderas, con un nivel de confianza del 95 %.

En las mediciones se detecta un valor de incertidumbre de ± 0.043 cm. Para llevar a cabo esta validación de manera precisa, es necesario lograr desplazamientos suaves y bien conocidos, lo cual no se puede garantizar con la instrumentación disponible. Sin embargo, se considera válida esta validación debido a que la tolerancia del alcance del proyecto es de 1 mm. Por lo tanto, el sistema es capaz de detectar tanto pequeños como grandes desplazamientos con una baja tolerancia.

5.3. Otras pruebas

Como parte del proyecto, se presentaron las métricas que debía cumplir para clasificarse como exitoso, considerando diversas características. El dispositivo debía cumplir con un tipo de sujeción a los árboles de manera no invasiva. Gracias al método utilizado para tomar las medidas del sensor, se pudo evitar la necesidad de realizar cualquier otra sujeción adicional, más allá de la del propio dendrómetro de banda.

Por otro lado, se contempló que el sistema elimina la pérdida de tiempo por desplazamiento. El dispositivo es capaz de funcionar con cualquier tipo de alimentación, por lo que, si se dispone de una fuente de alimentación de gran capacidad, el dispositivo puede trabajar sin interrupciones.

5.3.1. Análisis financiero

Costo del proyecto

Podemos observar el costo de los materiales en la tabla 5.4, la cual detalla el precio de los componentes utilizados. Para el proyecto, solo se incluyó la cantidad de materiales que

Tabla 5.4: Costo de los materiales del proyecto

| Componente | Costo del material (€) |
|--------------------------------|------------------------|
| Potenciómetro | 2,000 |
| Carcasa | 4,000 |
| Arduino Uno (proporcionado) | 0 |
| Modulo SD | 2,000 |
| Otros componentes electrónicos | 11,000 |
| Costo total | 19,000 |

Tabla 5.5: Costo de mano de obra

| Tipo de mano de obra | Costo (€) |
|----------------------|-----------|
| Diseño de carcasa | 0 |
| Impresión 3D | 3,500 |
| Ensamblaje | 0 |
| Programación | 0 |
| Costo total | 3,500 |

se utilizaron en un prototipo y no se contabilizan los materiales que fueron desechados debido a prototipos defectuosos.

También se ha considerado el costo de la mano de obra externa al proyecto. En este caso, el diseño de la carcasa y las piezas mecánicas, así como el ensamblaje de las piezas y la programación de la plataforma de control, se realizó como parte del proyecto. Estos costos también se han incluido en la tabla 5.5 como parte integral del proyecto y deben ser considerados.

Costo actual del CIF

También se consideraron los costos relacionados con los investigadores del CIF para llevar a cabo las mediciones con un dendrómetro manual cada 15 días. Esto incluyó los gastos de traslado y alimentación de los investigadores, el cual ronda €34,000. Además, es de suma importancia tener en cuenta el tiempo que los investigadores invierten movilizándose hacia la zona de estudio, el cual se estimó en un promedio de 6 a 8 horas. Por lo tanto, este tiempo adicional también se incluyó en el cálculo de costos. Es importante mencionar que los datos actuales presentados en el CIF fueron consultados con el profesor Dorian Carvajal.

Los datos obtenidos del costo por parte del CIF se consultaron en el documento administrado por el CFIA, Hora Profesional, en donde se obtiene un monto de costo por hora de C\$4,445 [40].

Beneficios potenciales

Ahorro de tiempo: Se pueden ahorrar de 6 a 8 horas cada 15 días para un investigador si se está llevando a cabo un estudio en una zona específica.

Mayor cantidad de datos recolectados: Esto permite tener un análisis completo y concreto, lo que a su vez facilita la toma de decisiones más informadas durante el análisis.

Reducción de costos adicionales: Esto incluye los costos de traslado del personal a las zonas de investigación, lo cual contribuye a la optimización de los recursos financieros del proyecto.

Análisis económico

El costo total inicial del sistema es de aproximadamente C\$22,500, lo cual incluye tanto los materiales como la mano de obra. Además, se ha considerado un beneficio adicional derivado de la recolección de datos por parte de los colaboradores, estimado en un rango entre C\$53,000 y C\$71,000 mensualmente, según las horas invertidas. También se tuvo en cuenta que el proyecto se llevó a cabo en un período de 6 meses, con mediciones tomadas cada 15 días, con el fin de observar el potencial retorno de la inversión del proyecto.

Tabla 5.6: Retorno de inversión

| Costo actual (C) | Costo extra de mano de obra (C) | Costo del proyecto (C) | Retorno de inversión (C) |
|------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| 460,000 | 224,100 | 22,500 | 213,400 |

El proyecto presenta un costo inicial de C\$246,600 y ofrece beneficios significativos en términos de ahorro de tiempo y reducción de costos adicionales asociados con el traslado y la alimentación del investigador. Aunque no se menciona explícitamente, el proyecto también proporciona un beneficio en términos de mejora en la calidad de los datos y la capacidad de realizar un análisis más detallado.

Dado que el proyecto parece generar ahorros significativos en comparación con sus costos iniciales, parece ser económicamente viable. Sin embargo, sería prudente considerar la posibilidad de la autonomía de los dispositivos en futuras iteraciones del proyecto para maximizar su utilidad y rentabilidad a largo plazo.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Al comienzo del proyecto, se consideraron los siguientes criterios de éxito con el fin de poder evaluar el cumplimiento de los objetivos al final del mismo.

Primeramente, que las piezas mecánicas tuvieran un factor de seguridad mayor a 2. En función de la validación que se realizó al sujetador, que es la única pieza sujeta a esfuerzos considerables, se concluyó que el instrumento diseñado posee un factor de seguridad de 15.

Se consideró también como criterio de éxito que el SNR tuviera un valor menor a 15 dB. Mediante la validación, se pudo comprobar que se logró adquirir un SNR mayor a 30 dB en la comunicación entre el potenciómetro y la plataforma de control.

Por último, el sistema diseñado tiene la capacidad de medir el crecimiento de los árboles o la disminución de su diámetro con una precisión de ± 1 mm. Se realizó la validación de este criterio y se consideró que el sistema se adapta bien a esa tolerancia para diámetros de troncos que pueden crecer entre 0.1 cm y 4 cm, por lo que se cumple este criterio.

Al momento de diseñar el proyecto, no se contempló un criterio para evaluar la autonomía del dispositivo. Cabe destacar que, si bien es posible alimentar el dispositivo con una fuente en la zona de estudio, no se realizaron ensayos que demuestren cuál es la autonomía del sistema. Debido a esto, se considera que el desempeño del instrumento es satisfactorio, pero para trabajos futuros se deben considerar criterios para la autonomía.

6.2. Recomendaciones

Se hacen las siguientes propuestas para futuros trabajos que se podrían mejorar o implementar:

- Considerar opciones de sensores que permitan una mayor independencia del sistema mecánico.
- Mejorar la interfaz de usuario para que sea más amigable, especialmente para quienes no están familiarizados con la herramienta.
- Utilizar un módulo que pueda indicar la fecha y hora actuales, para que los datos tengan una estampa de tiempo más precisa.

Bibliografía

- [1] Claudia Coccozza. En: *High-Resolution Analytical Approach to Describe the Sensitivity of Tree-Environment Dependences through Stem Radial Variation* (2018). URL: <https://www.researchgate.net/publication/323710485>.
- [2] Daniel Theodore W. En: *Principios de silvicultura* (1982). URL: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/1261>.
- [3] M.A Suárez. En: *INFLUENCIA DE LA PODA EN EL CRECIMIENTO DIAMETRAL DEL ALCORNOQUE* (2013). URL: https://www.uhu.es/franciscoj.vazquez/4CFE_InfluenciaPodaCrecimiento.pdf.
- [4] Juan P. Diez. En: *Receta práctica paso a paso para construir dendrómetros de punto de bajo costo* (2020). URL: https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/7538/INTA_CRPatagoniaNorte_EEABariloche_Diez_JP_Receta_Practica_Paso_A_Paso_Para_Construir_Dendrometros.pdf?sequence=1.
- [5] J Vasquez-Pique. En: *Riesgos por consumo de agua salada* (2009). URL: https://www.uhu.es/franciscoj.vazquez/5CFE_Dendr%C3%B3metroPotenciom%C3%A9trico.pdf.
- [6] Facundo Díaz. En: *Dendrometría* (2012). URL: <https://www.scribd.com/doc/93769900/dendrometria>.
- [7] Luis Ugalde. En: *Conceptos basicos de Dasometría* (1981). URL: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/886/Conceptos_basicos_de_dasometria.pdf?sequence=1.
- [8] Jorge Valle. En: *El dendrómetro como instrumento para evaluar el estado fenológico de la planta* (2011). URL: <https://galtel.wordpress.com/2011/09/05/en-dendrometro-como-instrumento-para-evaluar-el-estado-fenologico-de-la-planta/>.

- [9] TrackitAgro. En: *Dendrómetro: cómo medir en tiempo real el crecimientos de mis frutos* (). URL: <https://www.trackitagro.com/dendrometro-como-medir-en-tiempo-real-el-crecimientos-de-mis-frutos/>.
- [10] Interreg. *SENSORES DENDRÓMETROS DE TALLO/FRUTA*. Consultado el 25 de febrero de 2024. URL: <https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/sensores-dendrometros-de-tallo-fruta/#:~:text=Un%20dendr%C3%B3metro%20de%20banda%20consta,el%C3%A9ctrica%20proporcional%20a%20este%20cambio..>
- [11] High Tech. En: *DENTRÓMETRO DE BANDA MANUAL DBM80* (). URL: <https://www.htsperu.com.pe/dentrometro-de-banda-manual-dbm80-ict-international>.
- [12] Natkon. En: *ZN12-O-WP* (). URL: <https://natkon.ch/portfolio/zn12-o-wp/>.
- [13] Francisco Aguerre. En: *DIAMETRONCO. Desarrollo de un dendrómetro prototipo para su aplicación en redes de sensores inalámbricos* (2013). URL: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/2841>.
- [14] Electropreguntas. En: *Potenciómetros* (). URL: <https://electropreguntas.com/>.
- [15] DwyerOmega. *Galgas extensiométricas*. Consultado el 25 de Mayo de 2024. URL: <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html#:~:text=Las%20galgas%20extensiom%C3%A9tricas%20son%20sensores,el%20cual%20puede%20ser%20medido..>
- [16] Midebien. En: *GALGA EXTENSIOMÉTRICA* (). URL: <https://midebien.com/producto/galga-extensiometrica-lc11-hbm/>.
- [17] Plantsens. *Verdtech Nuevo Campo S.A.* Consultado el 25 de febrero de 2024. 2010. URL: [Citadoenpginas40y191](#).
- [18] Faranux. En: *MD0505 Variable Inductor IND23* (). URL: <https://www.faranux.com/product/md0505-variable-inductor/>.
- [19] Itztli. *INDUCTOR VARIABLE: TRABAJO, CIRCUITO, CONSTRUCCIÓN, TIPOS Y APLICACIONES*. Consultado el 25 de Mayo de 2024. URL: <https://www.itztli.es/inductor-variable-trabajo-circuito-construccion-tipos-y-aplicaciones/>.
- [20] Xukyo. En: *Uso de un codificador rotativo con Arduino* (). URL: <https://www.aranacorp.com/es/uso-de-un-codificador-rotativo-con-arduino/>.
- [21] Art Pini. En: *Cómo utilizar codificadores rotatorios para convertir rápidamente la rotación mecánica en señales digitales* (2018). URL: <https://www.digikey.com.mx/es/articles/how-to-use-rotary-encoders-convert-mechanical-rotation-digital-signals>.

- [22] Albert Baranera. En: *Breve explicación de que significan los dígitos en la clasificación IP* (2022). URL: <https://www.traza.com/blog/post/que-significa-ip65-ip66-ip67-en-las-caracteristicas-de-un-lector-o-terminal-de-mano>.
- [23] Charles Kolstad. En: *Tabla de Clasificación IP y Definiciones* (2019). URL: <https://tameson.es/pages/tabla-de-clasificacion-ip-y-definiciones>.
- [24] Charles Kolstad. En: *IP Rating Chart and Definitions* (). URL: <https://tameson.com/pages/ip-rating-chart-definitions>.
- [25] Filament2Print. *PETG vs PLA*. Consultado el 25 de febrero de 2024. 2019. URL: https://filament2print.com/es/blog/50_petg-vs-pla.html.
- [26] Kenny Medina. En: *Desarrollo de un prototipo digital de un Dendrómetro, para el monitoreo del crecimiento radial del tallo en un árbol de Teca, para la empresa MLR-Forestal* (2019). URL: <https://ribuni.uni.edu.ni/2685/1/93268.pdf>.
- [27] Adnan Sarwar. En: *Solar Powered Water Pumping System Automation and Control Using a Microcontroller for Aquaculture* (). URL: https://www.researchgate.net/publication/362594399_Solar_Powered_Water_Pumping_System_Automation_and_Control_Using_a_Microcontroller_for_Aquaculture.
- [28] BCD. En: *Raspberry Pi 4 Model B (8 GB)* (). URL: <https://www.bcdatlantik.shop/products/rp-pi4b-8gb/28944000005576300>.
- [29] Raspberry Pi. *¿Que es Raspberry Pi?* Consultado el 25 de febrero de 2024. URL: <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>.
- [30] Programarfacil.com. *ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip*. Consultado el 25 de febrero de 2024. URL: <https://programarfacil.com/esp8266/esp32/>.
- [31] Fritzing. En: *ESP32 Wroom-32U* (). URL: <https://forum.fritzing.org/t/esp32-wroom-32u/12978>.
- [32] Jumia. En: *Stm32l073rzt6 Mcu Nucleo L073rz* (). URL: <https://www.jumia.co.ke/generic-1-pcs-x-arm-stm32-nucleo-board-with-stm32l073rzt6-mcu-nucleo-l073rz-195528468.html>.
- [33] Ernesto Tolocka. *ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip*. Consultado el 25 de febrero de 2024. 2021. URL: <https://www.profetolocka.com.ar/2021/03/29/la-familia-de-microcontroladores-stm32/>.
- [34] Madhuvanthi Kannan. En: *Optimizing Strategies for Developing Genetically Encoded Voltage Indicators* (). URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2019.00053/full>.

- [35] Westher Eduardo Anchundia. En: *La relación señal –ruido - INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR SUDAMERICANO* (). URL: <https://toaz.info/doc-view-3>.
- [36] Steven D Ulrich Karl T. Eppinger. En: *Diseño y desarrollo de productos* (). URL: https://bibcatalogo.uca.es/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=909557&shelfbrowse_itemnumber=2706605.
- [37] DigiKey. En: *Potentiometer Linearity Tolerance* (). URL: <https://forum.digikey.com/t/potentiometer-linearity-tolerance/27694>.
- [38] Enrique Wabo. En: *Crecimiento de árboles* (). URL: <https://www.agro.unlp.edu.ar/materias/biometria-forestal>.
- [39] José Darío Martínez. *Significancia clínica sobre significancia estadística*. Consultado el 27 de mayo del 2024. URL: [\path{https://revistaalergia.mx/ojs/index.php/ram/article/view/334/656}](https://revistaalergia.mx/ojs/index.php/ram/article/view/334/656).
- [40] CFIA. En: *Hora profesional* (). URL: <https://cfia.or.cr/descargas/2020/dep/hora-profesional.pdf>.

Apéndice A

Apéndice

A.1. Entregable 1. Documento donde se enliste las diversas piezas y su estado, así como el nuevo equipo con el que se dispone para el nuevo diseño.

Tabla A.1: Tabla de componentes obtenidos en el CIF

| Componente | Estado | Reutilizable? |
|------------------------------|--------|---------------|
| Arduino UNO | Bueno | Si |
| Armazon de proyecto anterior | Malo | No |
| Carcasa hermetica | Bueno | No |
| Carcasa HOBO | Bueno | Si |
| Contador MEDER | Bueno | No |
| Dendrometro de banda | Bueno | Si |
| Modulo RFM69HCW | Malo | No |
| Modulo SD | Bueno | Si |
| MODULO ZS-042 | Malo | No |
| Sensor de humedad | Bueno | No |
| Sensores ultrasonicos | Malo | No |

Para este nuevo diseño se contaron con diferentes componentes brindados por el CIF. Los dispositivos marcados con (Sí) en la columna (Reutilizable) se escogieron para ser parte del nuevo proyecto de la tabla [A.1](#). Cabe destacar que varios de los componentes que no

se utilizaron no se acoplaron a las necesidades del proyecto o su estado no lo permitía.

A.2. Entregable 3. Diagrama de flujo de proceso lógico del sistema de automatizado.

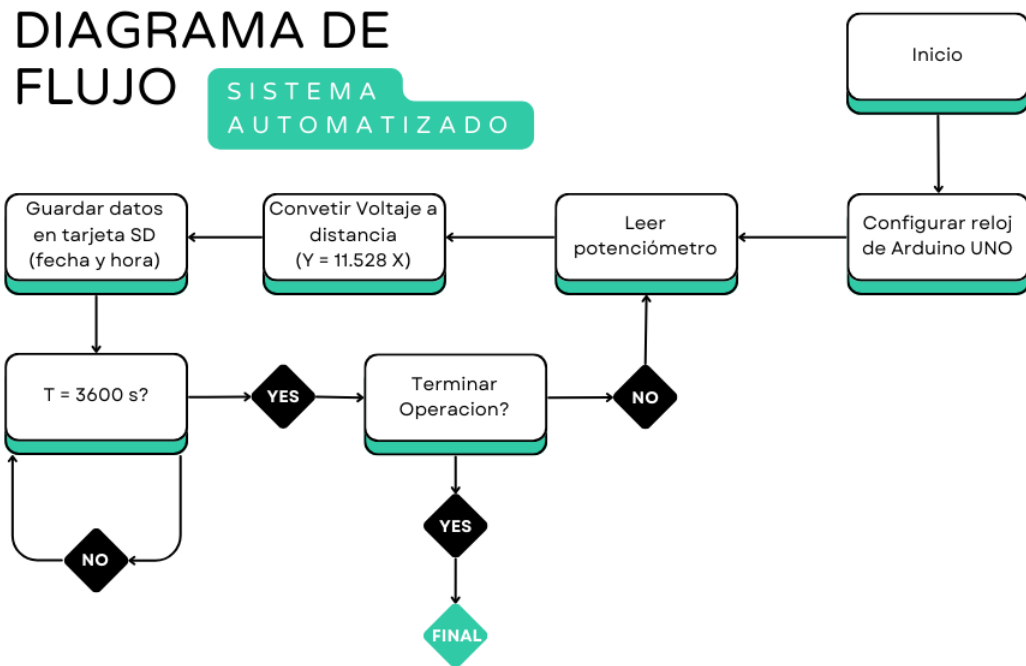


Figura A.1: Diagrama de flujo

A.3. Código del microcontrolador

Código del microcontrolador

```
1 #include <TimeLib.h>
2 #include <Time.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <SPI.h>
5
6 // Variables para tomar la medida del potenciometro
7 float oldValue = 0.00;
8 float Delta = 0.00;
9 float Desplazamiento = 0.00;
10
11 // Variables para poder almacenar la información en la SD card
12 File Data;
13 int pinCS = 04;
14
15 //Variable para definir fecha y hora
16 time_t fecha;
17
18 void setup() {
19     // inicia la comunicación serial a 9600 bits por segundo
20     Serial.begin(9600);
21     pinMode(pinCS, OUTPUT);
22
23     //Inicializa la SD card
24     if (SD.begin())
25     {
26         Serial.println("SD Card lista para usar");
27     } else
28     {Serial.println("SD card fallo inicialización");
29     return;
30     }
31     setTime( 8, 0, 0, 17, 05, 2024);
32 }
```

Código del microcontrolador

```
1 void loop() {
2   // lee la se al anal gica del potenci metro en el pin A0
3   int sensorValue = analogRead(A0);
4   // Convierte la medici n de la escala (0 a 1023)
5   // a una escala en voltaje (0V a 5V)
6   float Voltaje = sensorValue * (5.00 / 1023.00);
7   fecha = now();
8
9
10  // Guarda el valor inicial del potenci metro
11  if (oldValue == 0.00)
12  {
13    Delta = Voltaje - oldValue;
14    oldValue = Voltaje;
15    // nos brinda el dato inicial ,
16    // con el cual se van a calcular los deltas
17    Serial.println("Iniciando");
18  }
19  // despu s de la primera iteraci n ,
20  // la plataforma de control nos brinda
21  // los deltas del las variaciones de di metro en el arbol
22  else
23  {
24    // Calculo del delta
25    Delta = Voltaje - oldValue;
26    // caracterizaci n de los datos del potenci metro ,
27    // y darnos el dato de la distancia
28    Desplazamiento = 11.528 * Delta;
29    //Serial.println(Delta);
30    Serial.print(hour(fecha));
31    Serial.print(":");
32    Serial.print(minute(fecha));
33    Serial.print(":");
34    Serial.print(second(fecha));
35    Serial.print(" ");
36    Serial.print(day(fecha));
37    Serial.print("/");
38    Serial.print(month(fecha));
39    Serial.print("/");
40    Serial.print(year(fecha));
41    Serial.print(",");
42    Serial.println(Desplazamiento);
43  }
```

Código del microcontrolador

```
1  Data = SD.open ("Data.txt",FILE.WRITE);
2  if (Data){
3    Data.print(hour(fecha));
4    Data.print(":");
5    Data.print(minute(fecha));
6    Data.print(":");
7    Data.print(second(fecha));
8    Data.print(" ");
9    Data.print(day(fecha));
10   Data.print("/");
11   Data.print(month(fecha));
12   Data.print("/");
13   Data.print(year(fecha));
14   Data.print(",");
15   Data.println(Desplazamiento);
16   Data.close();
17 }
18 else {
19   Serial.println("Error almacenando");
20 }
21
22
23 delay(3600000);
24 }
```

A.4. Datos de Validación SNR

Tabla A.2: Validación de SNR

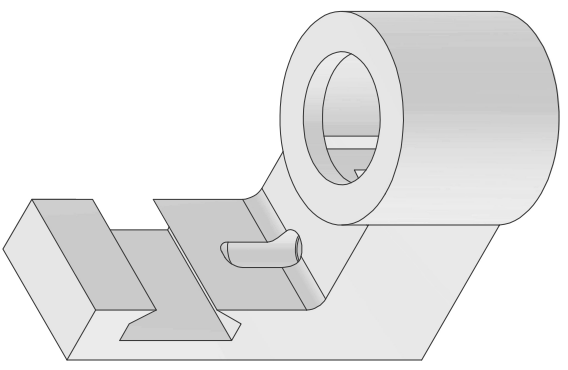
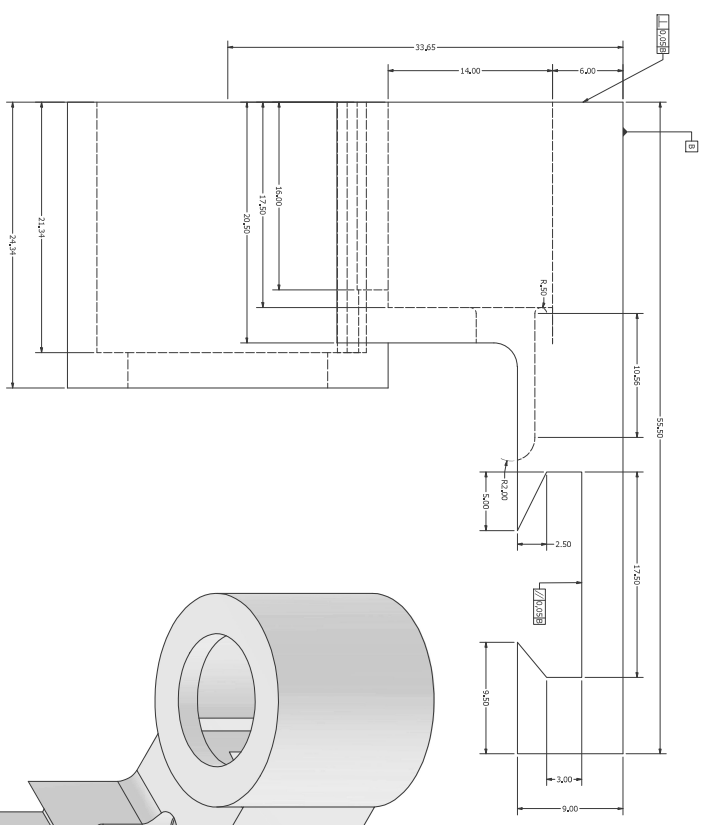
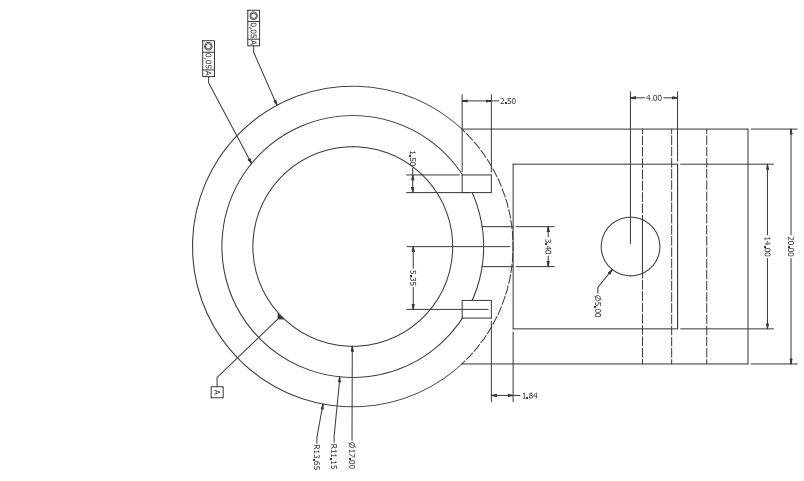
| Dato 1 | Dato 2 | Dato 3 | Dato 4 | Dato 5 | Dato 6 | Dato 7 | Dato 8 | Dato 9 | Dato 10 | Dato 11 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1.37 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 |
| 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 |
| 0.06 | 0 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0 |
| 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 |
| 0 | 0 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0 | 0 |

A.5. Datos de validación de medición de precisión

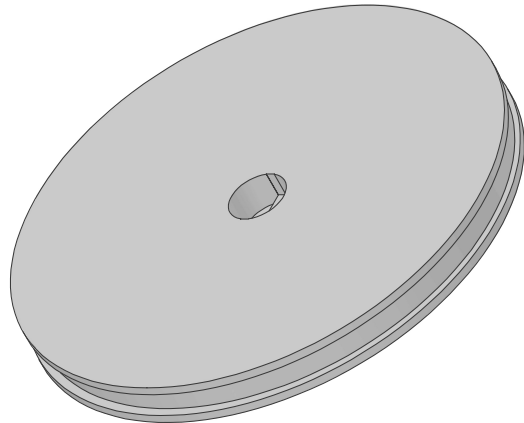
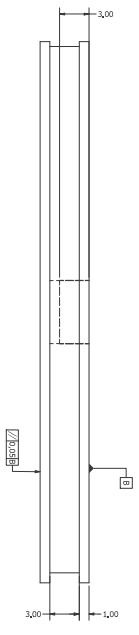
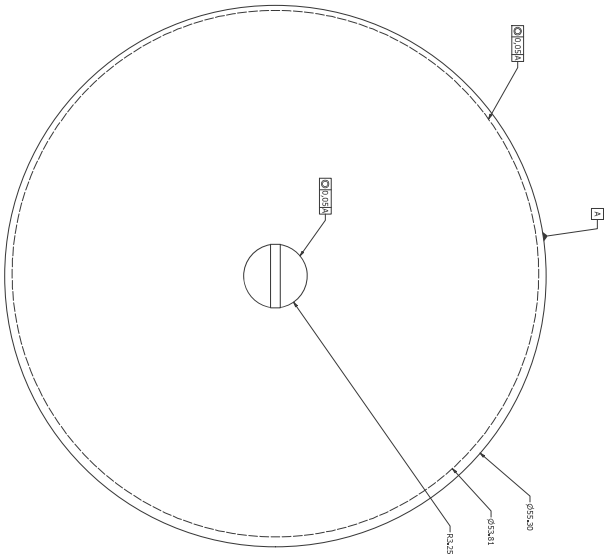
Tabla A.3: Validación de medición del dendrometro

| Medida dendrometro manual | Medida obtenida | Delta | Desviación estándar | N |
|---------------------------|-----------------|-------|---------------------|-----|
| 0.100 | 0.088 | 0.012 | 0.025 | 81 |
| 0.500 | 0.477 | 0.023 | 0.030 | 84 |
| 1.000 | 0.961 | 0.039 | 0.008 | 75 |
| 1.200 | 1.178 | 0.022 | 0.014 | 77 |
| 1.800 | 1.765 | 0.035 | 0.023 | 82 |
| 2.400 | 2.388 | 0.012 | 0.024 | 83 |
| 2.700 | 2.679 | 0.021 | 0.025 | 101 |
| 3.000 | 2.989 | 0.011 | 0.007 | 81 |
| 3.700 | 3.643 | 0.057 | 0.024 | 83 |
| 4.000 | 3.918 | 0.082 | 0.025 | 88 |

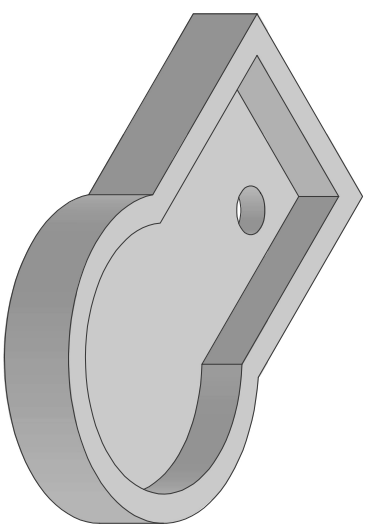
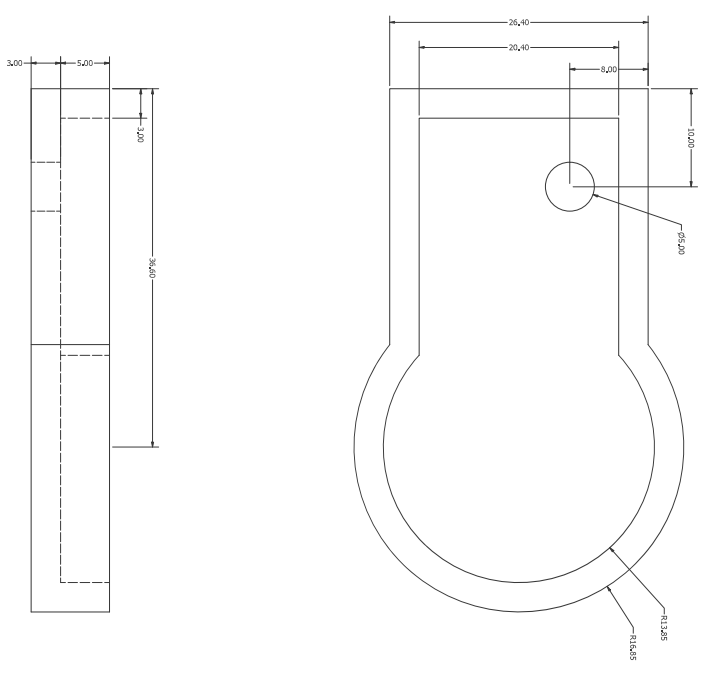
A.6. Entregable 2. Planos de piezas diseñadas



| | |
|------------------|-------------------------------------|
| PROYECTO | Instancia Tecnológica de Costa Rica |
| FECHA | 18/07/2024 |
| TÍTULO | Automatización de densitómetro |
| PROFESOR | Ing. Carlos |
| ESTUDIANTE | D. 1 |
| GRUPO | 6-1 |
| CARGA | 1 |
| FECHA DE ENTREGA | 18/07/2024 |



| | |
|-------------|---------------------------------------|
| PROYECTO | Instalación Tecnológica de Costa Rica |
| FECHA | 18/07/2024 |
| PROYECTANTE | |
| APROBADO | |
| TÍTULO | Automatización de dendrómetro |
| OBJETO | Proyecto |
| ESCALA | 1:1 |
| FECHA | 18/07/2024 |
| HOJA | 1 |
| TOTAL | 1 |



| | |
|-------------|-------------------------------|
| INSTITUCIÓN | Escuela N.º 5129/2024 |
| FECHA | |
| PROFESOR | |
| ASIGNATURA | Automatización de dentómetros |
| TÍTULO | D |
| GRUPO | 1 |
| TEMA | Tapas de carcasa |
| FECHA | 5-11 |
| HOJA | 1 DE 3 |