



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Monitoreo del flujo de savia para el riego de precisión en árboles de manzana

Tesis:

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de maestro en ingeniería

Presenta:

Ing. Leonel Iván García Moreno

Director de tesis:

M.C. Eduardo Gamero Inda

Codirector:

Dr. Francisco Javier Godínez García.





Monitoreo del flujo de savia para el riego de precisión en árboles de manzana

Presenta:

Leonel Iván García Moreno

COMITÉ TUTORIAL

M.C. Eduardo Gamero Inda Director	 Firma
Dr. Francisco Javier Godínez García Codirector	 Firma
Dr. Rubén Guerrero Rivera Asesor	 Firma
M.C. José Antonio Martínez Rivera Asesor	 Firma

Dra. Norma Alicia García
Coordinadora del programa del posgrado correspondiente

Dr. Francisco Javier Godínez García
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

Durango, Dgo. México mayo 2024



Victoria de Durango, Dgo., a **13 / Mayo / 2024**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 142 / 24.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. LEONEL IVÁN GARCÍA MORENO
No. DE CONTROL G14041145
PRESENTE.

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

"MONITOREO DEL FLUJO DE SAVIA PARA EL RIEGO DE PRECISIÓN EN ÁRBOLES DE MANZANA"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica
"La Técnica al Servicio de la Patria"


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG/ammc





Victoria de Durango, Dgo., a **13 / Mayo / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 141 / 24.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. LEONEL IVÁN GARCÍA MORENO
No. DE CONTROL G14041145
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:

"MONITOREO DEL FLUJO DE SAVIA PARA EL RIEGO DE PRECISIÓN EN ÁRBOLES DE MANZANA"

CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
CAPÍTULO V	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
	ANEXOS

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG/ammc



Agradecimientos

Agradezco a CONAHCYT por brindar el apoyo para la obtención de mis estudios de posgrado.

A través de este trabajo agradezco también a todas las personas que han hecho esto posible.

A mis familiares por su apoyo en toda mi carrera y por su apoyo incondicional, a mi padre Lionel García y mi madre Rosario Moreno por sus buenos consejos y su excelente ejemplo y a mis hermanos Anna y Jassiel.

A mis compañeros de maestría también por estar ahí durante el proyecto compartiendo experiencias y vivencias en esta etapa.

A mis maestros de posgrado y comité tutorial por su orientación y apoyo, a el Dr. Francisco Javier Godínez García y Dr. Rubén Guerrero Rivera por los conocimientos compartidos y particularmente a mi director de tesis, M.C. Eduardo Gamero Inda por su dirección y apoyo durante esta etapa de mi preparación profesional.

A todos muchas gracias.

Resumen

En la actualidad el cambio en los procesos de producción agrícola representa un reto de mucha importancia donde los procesos de automatización y control juegan un rol fundamental, por esto es de gran importancia proponer soluciones adaptadas a las necesidades con soluciones eficientes que sean acorde a la agricultura.

El presente trabajo muestra el diseño e implementación de un sensor para el monitoreo de flujo de savia en árboles frutales de manzana mediante el uso de tecnologías de radiofrecuencia para transmisión de datos e internet de las cosas como método de visualización remota en tiempo real y así tener un control apropiado de los recursos naturales e insumos requeridos del mismo.

El sistema consta de un microcontrolador STM32 Nucleo-F411RE[®] como módulo de recolección de datos, un par de antenas de radiofrecuencia NRF24L01 de protocolo SPI, con banda de operación 2.4Ghz, así como un módulo MOS de potencia, en conjunto de los sensores de temperatura DS18B20 y un cartucho calefactor de 30w, para la parte de la recepción y análisis de datos una tarjeta ESP32 con tecnología Wi-Fi que se encarga de cargar los datos a la nube por medio de la plataforma *ThingSpeak*[™].

Tabla de contenido

CAPÍTULO I.....	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivos	14
General	14
Objetivos específicos	14
1.3 Justificación.....	15
1.4 Delimitación del problema	15
1.5 Antecedentes	16
1.6 Estado del arte	17
1.6.1 Medidor de Flujo de Savia SFMI	17
1.6.2 Sensor de flujo de savia digital SDI-12.....	18
1.6.3 Sensor basado en el método HRM (Heat Ratio Method)	19
1.6.4 Sensores de temperatura RTD (resistencia dependiente de la temperatura).....	19
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Agricultura de precisión.....	21
2.2 Sensores.....	21
2.3 Sensores de temperatura DS18B20.....	23
2.4 Microcontroladores	25
2.4.1 Memoria RAM.....	26
2.4.2 Memoria ROM.....	26
2.4.3 Resolución en bits.....	26
2.4.4 Señales digitales	27
2.5 Monitoreo y adquisición de datos	27
2.5.1 Transmisión.....	28
2.5.2 Comunicación WiFi.....	29
2.5.3 Protocolo de comunicación One Wire (1-Wire).....	29
2.6 Fuentes de alimentación.....	30
2.7 Métodos de medición de flujo de savia	32
2.7.1 Método THB	32

2.7.2 Método HFD	33
CAPÍTULO III.....	35
METODOLOGIA	35
3.1 Diseño base del dispositivo	35
3.2 Tabla de comparación de componentes.....	37
3.3 Módulo de medición.....	40
3.4 Modelo e impresión 3D.....	41
3.4.1 Montura para gabinete del módulo emisor	41
3.4.2 Caja protectora de cartucho calefactor y sensores.....	42
3.5 Pruebas de funcionamiento	43
3.6 Programación de dispositivos.....	45
3.7 Interfaz gráfica	47
3.8 Pruebas de funcionamiento	49
3.9 Características del cultivo	51
3.9.1 Características del suelo.....	51
3.9.2 Características del clima	52
3.9.3 Sistema Radicular	53
3.9.4 Sistema Aéreo.....	54
3.9.5 Secciones del tronco.....	54
3.9.6 Savia y sus características	56
3.9.7 Morfología de los manzanos	57
3.9.8 Necesidades de agua en huertos de manzano	57
CAPÍTULO IV.....	59
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	59
4.1 Análisis de flujo de savia mediante interfaz gráfica.....	64
Conclusiones y recomendaciones.....	68
Referencia	69

Índice de figuras.

<i>Figura 1. Medidor de flujo de savia sfm1</i>	17
<i>Figura 2. Sensor de flujo de savia digital sdi-12 en campo</i>	18
<i>Figura 3. Imagen con la posición de los sensores durante el proceso de</i>	20
<i>Figura 4. Tipos de señales analógicas y digitales.</i>	22
<i>Figura 5. Diagrama de conexión de sensor ds18b20 usando una fuente de alimentación externa.</i>	24
<i>Figura 6. Encapsulado de acero inoxidable de sensor ds18b20.</i>	25
<i>Figura 7. Diferentes modelos de chip nrf24l01 y modelo con antena sma a la derecha.</i>	28
<i>Figura 8. Diagrama esquemático de conexión maestro varios esclavos de protocolo one wire.</i>	30
<i>Figura 9. Diagrama de funciones generales del dispositivo de medición</i>	36
<i>Figura 10. Gabinete de módulo de medición.</i>	40
<i>Figura 11. Prototipos de modulo emisor y receptor a la derecha.</i>	41
<i>Figura 12. Diseño de soporte para gabinete emisor.</i>	38
<i>Figura 13. Case protector de cartucho y sensores impreso en 3d en filamento asa.</i>	38
<i>Figura 14. Protector modulo emisor impreso con filamento asa.</i>	39
<i>Figura 15. Prueba de funcionamiento en tres etapas seco, en agua y ambiental.</i>	40
<i>Figura 16. Termómetro digital patrón para calibración de sensores ds18b20.</i>	41
<i>Figura 17. Diagrama de bloques de código dispositivo emisor</i>	42
<i>Figura 18. Diagrama de bloque del código receptor.</i>	43
<i>Figura 19. Ventana principal de la Interfaz para graficar datos separados por coma.</i>	44
<i>Figura 20. Interfaz con datos graficados.</i>	45
<i>Figura 21. Instalación en árbol de eucalipto.</i>	46
<i>Figura 22. Gráficas de sensores en la plataforma Thingspeak TM.</i>	46
<i>Figura 23. Simulación de tronco dimensiones de perforación.</i>	51
<i>Figura 24. Medidor de flujo de savia con protector de sondas y cartucho calefactor y receptor con carcasa protectora.</i>	55
<i>Figura 25. Gráfica de sensores respuesta en °C con tiempo aproximada de medición.</i>	56
<i>Figura 26. Gráfica ampliación de respuesta de ambos sensores, temperatura con desfase de 0.5°C.</i>	56
<i>Figura 27. Instalacion de dispositivo en árbol tipo pino.</i>	57
<i>Figura 28. Gráfica de sensores respuesta durante el día.</i>	58
<i>Figura 29. Gráfica de sensores respuesta durante la noche.</i>	60
<i>Figura 30. Gráfica de sensores respuesta durante la tarde, procesada con la interfaz gráfica.</i>	65
<i>Figura 31. Grafica de sensores respuesta durante la tarde, procesada con la interfaz gráfica.</i>	66

Lista de tablas.

<i>Tabla 1. Características básicas del sensor DS18B20</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Principales diferencias entre los diferentes protocolos Wi-Fi.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Consumo de corrientes.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Fuente de alimentación externa</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 5. Tabla de comparación de componentes.</i>	<i>38</i>

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Un problema generalizado en la actualidad es la escasez de agua, sobre todo en condiciones de climas áridos y semiáridos, así también como en grandes ciudades, considerando la demanda creciente de alimentos para poder establecer una seguridad alimentaria con productos de calidad, es necesario contar con un plan adecuado del uso de los recursos hídricos, así como el uso eficiente de estos.

En gran parte de las regiones con clima semiárido, debe sobrellevarse la escasez de agua y considerando que el sector agrícola demanda una parte considerable del agua disponible, confrontando en muchas ocasiones importantes recortes en las asignaciones de agua disponible para riego.

Esto genera la principal problemática que lleva a la búsqueda de soluciones, basados en el desarrollo tecnológico, que puedan mantener y que logren incrementar el uso eficiente del vital líquido y se puedan mantener las producciones.

Por esto se propone el análisis de flujo de savia de las plantas que es poco o nada común a la hora de tomar decisiones de los cultivos, debido al desconocimiento que se tiene de este tema. Por esto se propone desarrollar un medidor de flujo de savia que brindara una herramienta importante para beneficio de la producción del cultivo, el desarrollo de la tecnología y la ciencia, logrando un uso eficiente de los recursos naturales, generando un ambiente más saludable y ayudar directamente a la producción.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad existen diferentes productos orientados a el censado de flujo de savia, así como empresas que prestan este servicio, esto genera la principal problemática que es la accesibilidad puesto que están orientados a productores grandes o directamente a empresas ya que son costosas, por esta razón este proyecto presenta una alternativa para la generación de dichos dispositivos con sensores de bajo costo y fácil adquisición que sean accesibles a los productores locales.

Uno de los desafíos del mundo moderno es considerar también el impacto que tiene toda actividad humana al ambiente y como aprovechar correctamente los recursos que se tienen ya sea por sus escasas o para no generar una sobreexplotación.

Teniendo en cuenta esto el desconocimiento acerca del flujo de savia y el déficit hídrico proporciona un área de oportunidad y desarrollo que cubra las áreas de riego de precisión.

Estas condiciones representan un reto para el desarrollo de nuevas herramientas que ayuden a tener eficiencia a la hora de utilizar los recursos y de optimización de procesos que beneficien de forma directamente a uno de los sectores más afectados y con menor apoyo hoy en día, para por esto se plantea utilizar tecnologías y dispositivos de última generación, así como el desarrollo de sistemas de gran utilidad para el riego de precisión y el análisis de déficit hídrico.

1.2 Objetivos

General

Diseñar un sistema de monitoreo de flujo de savia con tecnologías de última generación, bajo costo y fácil adquisición, con el fin de ofrecer una alternativa para hacer eficiente la utilización de los recursos hídricos.

Objetivos específicos

- Utilizar el método HFD (Deformación de Campos de Calor) para la determinación del flujo de savia en el árbol.
- Utilizar dispositivos con microcontroladores de última generación de bajo costo y fácil adquisición.
- Generar una propuesta de aplicación para el procesamiento de datos recabados por el sistema.
- **Hipótesis**

El análisis de flujo de savia permite el uso eficiente de los recursos, que a su vez tendrán un efecto positivo en el desarrollo del cultivo y una notable mejorar los niveles de producción por árbol.

1.3 Justificación

La necesidad de optimizar la cantidad de agua para riego de huertas pequeñas y medianas con árboles de manzana y optimizar también la relación de cantidad de nutrientes contra producción de fruta por árbol.

Este dispositivo será utilizado para llevar a cabo el análisis de las diferentes variables a través de la nube y su posterior análisis y que podrán ser utilizados en trabajos posteriores así mismo el ensamblaje y prueba de los diferentes componentes electrónicos que permitan su ejecución.

Dado que la utilización de dispositivos electrónicos representa una inversión grande se deja de lado a los medianos y pequeños productores, lo que dificulta la obtención de información que ayude en la mejora de rendimiento y del aprovechamiento de los recursos e insumos, dado que representan muchas desventajas para los mismos y dado que la tecnología avanza de forma acelerada es necesario mantener un estudio constante de las alternativas que ofrece el mercado para tener una solución a este tipo de problemas en las áreas agroindustriales.

1.4 Delimitación del problema

El presente trabajo de investigación se limita al monitoreo de flujo de savia por medio del método de deformación de campos de calor, así como el armado de dispositivo y la red para la transmisión y análisis de datos de forma remota.

Los componentes electrónicos y programas utilizados para el proyecto en cuestión serán de uso comercial, en este proceso se llevará a cabo la generación de prototipos y se hará calibración de sensores para su correcto funcionamiento.

Para esto se utilizará las placas Arduino[®] por su bajo costo y fácil adquisición el código se genera en el mismo ambiente de desarrollo de Arduino[®] para su posterior uso en las placas

STM NUCLEO[®] compatibles con este ambiente y las placas ESP32 Wifi para cargar los datos a la nube y su análisis en la plataforma Thingspeak[™] para visualizarlos.

1.5 Antecedentes

La estimación de la evapotranspiración de un cultivo es necesario tener en cuenta las necesidades de cada cultivo y las condiciones ambientales que tiene, con estas estimaciones es posible saber si se satisface las demandas de riego de los cultivos (Jensen Wright, 1978).

Un cultivo tiene sus necesidades hídricas que dependen de la transpiración de la planta además del proceso de pérdida de agua debido al sistema suelo-planta, es decir por evaporación de transpiración de la planta (Burman y Pochov, 1994).

Existen diferentes métodos para la estimación del flujo de savia donde la mayoría se basan en el uso de métodos termodinámicos, con el uso de sensores de temperatura y dispositivos de inducción de calor.

De entre los diseños más antiguos se encuentran los diseños de Granier (Granier 1985), que constan de la utilización de un par de sondas que se insertan en el tejido de la especie a monitorear, se insertan entre 10 a 15 cm de distancia alineándolo al flujo de savia en el sentido del flujo. La cual se mantiene a una potencia constante aplicada al calentador.

Investigadores realizaron la evaluación de los medidores de flujo de savia para árboles pequeños, utilizando un método llamado HRM (Heat Ratio Method). En árboles de Eucaliptus de un año de edad, evaluando la posición de las sondas y la potencia que se aplica al calefactor. (Reyes, Jara, & Jeldres, 2007).

Medidores de flujo de savia para plantas que tienen condiciones de invernadero y condiciones más controladas, con el principal objetivo está enfocado en la transpiración de las plantas,

este proyecto utilizo diferentes métodos dentro de los cuales se encontraba el de disipación de calor, compensado la diferencia de pesos entre plantas. (Reyes, Esquive, & Franco, 2010).

Uso de RTD utilizadas en este tipo de mediciones de temperatura, utilizados para hacer la adquisición más precisa de manera que se tiene una aproximación más exacta de la temperatura en grados Celsius. (Walendziuk, Idzkowski, Machacek & Slanina, 2015).

Se realizaron cálculos de en flujo de savia con el método LHB (Balance de Calor Lineal) en árboles de abeto, basados en ecuaciones de fundamentadas en las teorías de transferencia de calor de conducción y convección y los datos fueron comparados con el método HFD. (Trcala & Cermak, 2016).

Diferentes proyectos utilizando el método de deformación de campos de calor que es también una forma basada en técnicas termodinámicas para la medición del flujo de savia, con mediciones con más resolución útiles para el estudio de ambientes con cambios abruptos. (Nadezhda Nadezhdina, 2008).

1.6 Estado del arte

1.6.1 Medidor de Flujo de Savia SFMI

El medidor SFM1 es autosostenible e independiente para la medición de la transpiración en plantas o medición de flujo de savia. Este utiliza el Método de Cociente Calórico (HRM-Heat Ratio Method), es capaz de medir flujos de árboles muy grandes y pequeños, así como de tallos leñosos tanto velocidades bajas como altas. Este es similar al Método de Deformación de campos de calor (HFD-Heat Field Deformation), este medidor es capaz de medir flujo cero y velocidades reversas de flujo de savia.



Figura 1. Medidor de flujo de savia SFMI, <https://www.lapacar.com/>

1.6.2 Sensor de flujo de savia digital SDI-12

El sensor de flujo de savia SDI-12 puede medir el movimiento de agua en las raíces, tallos y ramas de las plantas. Comúnmente, se mide el flujo en la sección del tronco donde están los vasos conductores de la xilema de la planta en la parte conocida como albura, flujo de savia es sinónimo de transporte de agua, nutrientes y hormonas, los parámetros que mide son a partir de la velocidad de pulso de calor (Heat Pulse Velocity), correspondiente a el xilema.



Figura 2. Sensor de flujo de savia digital SDI-12 en campo, <https://blog.biofisicaambiental.com/sensor-de-flujo-de-savia-implexx>

1.6.3 Sensor basado en el método HRM (Heat Ratio Method).

Este método se utiliza para la evaluación de flujo de savia en árboles pequeños, se usó también para evaluar árboles de eucalipto con un año de edad, las variables que fueron evaluadas corresponden a la potencia eléctrica aplicada al calefactor y la posición en el medidor de los termopares. (Reyes, Jara & Jeldres, 2007).

Fundamentalmente las variables de entrada de este método son las variaciones de temperatura, sin estas diferencias el método no puede ser desarrollado. Los cambios de temperatura corresponden proporcionalmente a la medición de savia.

1.6.4 Sensores de temperatura RTD (resistencia dependiente de la temperatura).

Estos sensores tienen la capacidad de medir la temperatura gracias al cambio de la resistencia que depende de la temperatura. Este tipo de dispositivos tienen una buena respuesta a los cambios de temperatura, se realizaron investigaciones sobre las RTD, especialmente en las Pt100 para determinar dentro del flujo con varios tipos de RTD y se muestra en detalle cada una de ellas. (Walendzauk, Idzkowski, Machacek & Slanin 2015).

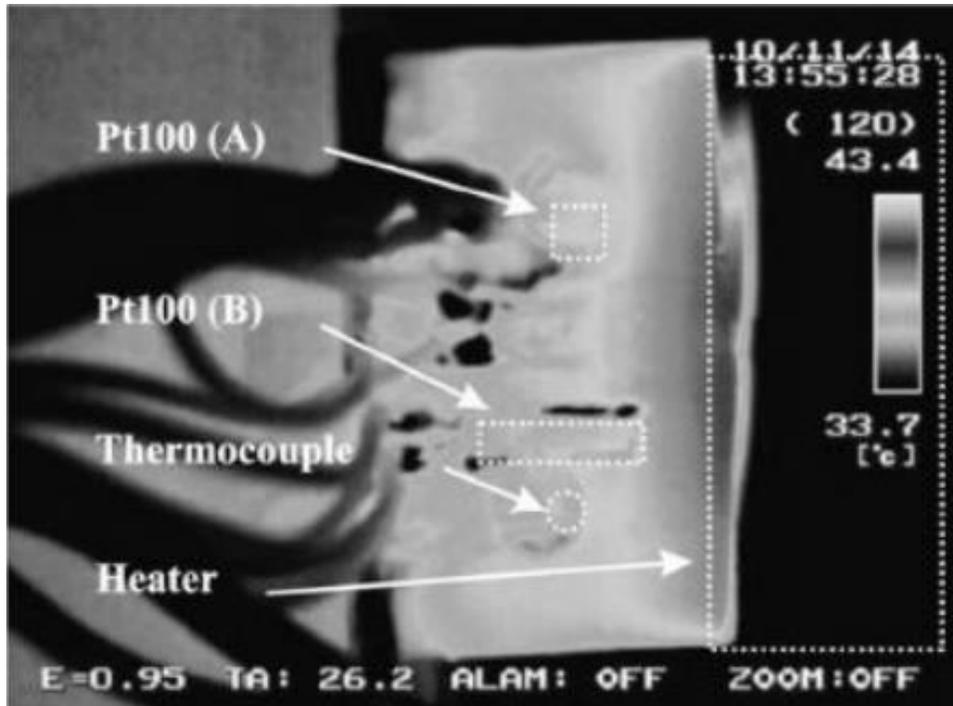


Figura 3. Imagen con posición de los sensores durante el proceso de medición, Walendziuk, Idzkowski, Machacek, & Slanina, 2015.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Agricultura de precisión

En la actualidad se observan grandes cambios tecnológicos que tiene que ver con el desarrollo de la electrónica y de las tecnologías de la información que con el crecimiento de la agricultura de precisión, la agricultura de precisión se diferencia de la agricultura tradicional ya que esta toma a los campos agrícolas como si estos fueran homogéneos y al aplicar los diferentes insumos no se consideraba las diferentes variables que están involucradas en la producción ni tampoco las causas que generaban estas variable.

De este modo la agricultura de precisión es aplicar las principios y tecnologías al manejo de las diferentes variables involucradas en la producción agrícola, y así mejorar la calidad ambiental y productividad del cultivo. (Pierce y Nowak, 1999).

Con este enfoque, las diferencias entre estas dos son claras pues con la agricultura de precisión existe la posibilidad de utilizar insumos de manera más crítica y con las dosis adecuadas, todo este con las características particulares de cada cultivo.

2.2 Sensores

Para la lectura de señales, independientemente de la variable que será representada, se implementa el uso de dispositivos conocidos como sensores, estos tienen como base la electrónica, permitiendo detectar cambios de las variables físicoquímicos que se encuentran en el entorno, a través de las variaciones de valores entre el voltaje y la corriente, estos son presentados de manera directa o indirecta en un circuito.

En la actualidad los mayormente utilizados son los: analógicos y digitales. La principal diferencia que existe entre estos es la manera en la que los datos son leídos por parte de cada sensor, debido a que los sensores digitales trabajan a partir de valores binarios, esto quiere decir de 1 o 0. Estos valores están presentes como con una frase o un censado, conocido como resolución. En los sensores digitales representa la cantidad de números binarios que se encuentran. (Robótica, 2017)

Por otra parte, en los sensores analógicos tienen la característica de enviar un rango de valores instantáneos, y tiene las dimensiones de lo que se mide. Donde las que se encuentran de medición directa como los son la presión, voltaje, luminosidad y los que son normalmente utilizados para este tipo de proyectos, medición de temperatura.

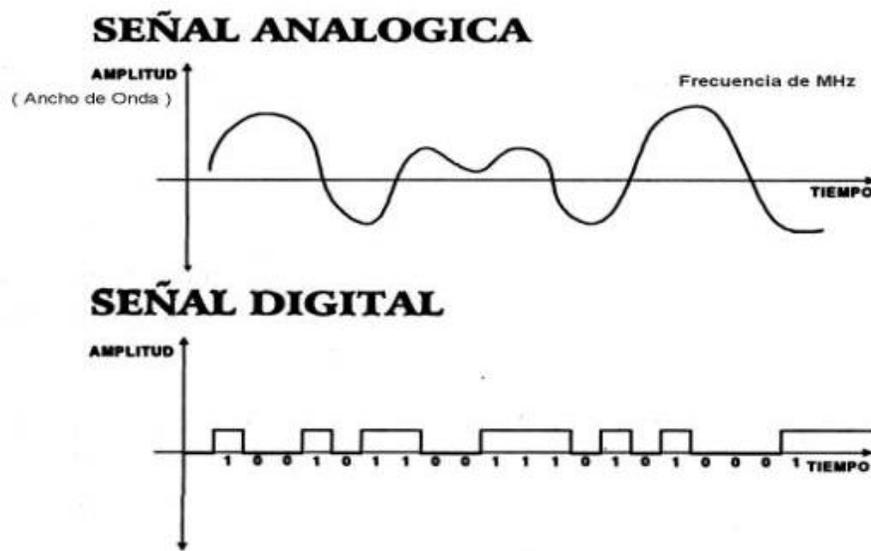


Figura 4. Tipos de señales analógicas y digitales, robótica, 2017.

2.3 Sensores de temperatura DS18B20

El sensor de digital de temperatura DS18B20 usan el protocolo de comunicación 1-Wire (Un solo cable) para comunicarse, este protocolo de comunicación de un solo pin de comunicación de datos y permitiendo la conexión de varios sensores en el mismo bus de comunicación.

Este construido por la empresa Máxim Integrated TM, el cual cuanta con un encapsulado de tipo TO-92 similares al utilizado en transistores más pequeños. Las opciones comerciales más utilizados por ser más robustas, son las que están dentro de un tubo de acero inoxidable que lo protege contra el agua, este es con el que se trabajara en este proyecto.

Con este dispositivo es posible la medición temperaturas dentro del rango de los -55 hasta 125°C, con posibilidad de programar la resolución de 9 a 12 bits. Estos sensores poseen una dirección de 64 bits establecida de fábrica, esencial para la comunicación de dispositivos, esto es muy importante para el proyecto ya que se utilizarán dos de estos dispositivos.

Este sensor posee dos tipos de métodos de alimentación, utilizando la alimentación de una fuente externa y el otro a por la conexión de pin de datos.

Para alimentar con fuente externa se conecta el pin VDD (voltaje de alimentación positiva). de modo que el voltaje es constante sin importar la cantidad de datos del bus 1-Wire.

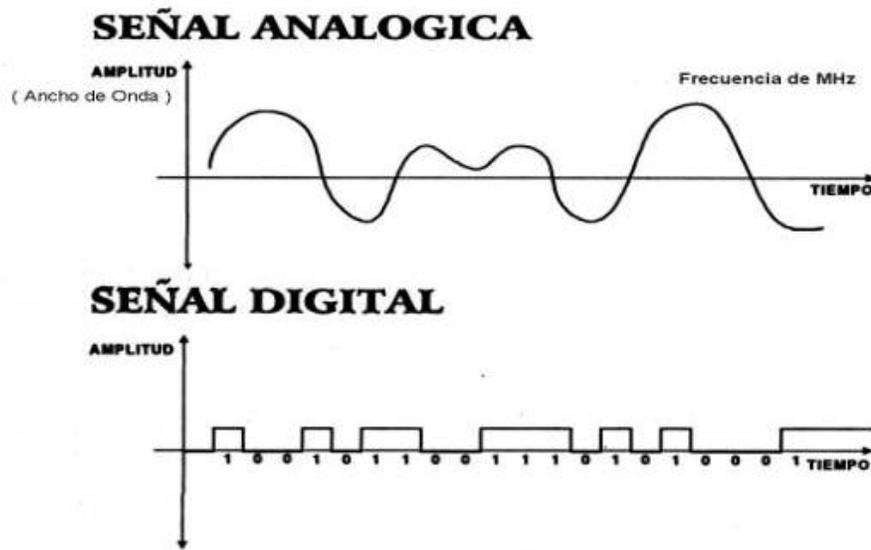


Figura 5. Diagrama de conexión de sensores DS18B20 usando una fuente de alimentación externa, https://naylorlampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html.

El conectar el de pin de datos se obtiene energía cuando este se encuentra en un estado alto y almacenando la carga para cuando la línea de datos este en un estado bajo, a este método es llamado “Parasite Power” usado si es que el sensor debe estar conectado a distancias largas o si es que se cuenta con espacio limitado, debido a que de esta forma no es necesario la conexión de VDD.



Figura 6. Encapsulado de acero inoxidable de sensor DS18B20,
https://naylorlampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html

Tabla 1. Características básicas de los sensores digitales DS18B20.

Sensor de temperatura DS18B20	
Voltaje de alimentación	3.0 a 5.5V
Resoluciones disponibles	9-12 bits
Rango de Temperaturas	Desde -55 a 125°C
Cables de conexión	(VCC)Rojo, (GND)Negro, (Data)Amarillo
Dimensiones del cable	100cm
Encapsulado	6x50mm
Peso	30g
Precisión	±0.5 °C de -10 a +85 °C
Interfaz de comunicación	Un solo cable (1-Wire)

Las conexiones a realizar de alimentación y las conexiones utilizadas para los microcontroladores se describen más adelante en este documento, así como la programación y uso de las diferentes librerías utilizadas y obtención de datos de cada dispositivo, así como la lo visto en la tabla 1.

2.4 Microcontroladores

Se conoce como microcontrolador a los circuitos integrados que tienen en su interior las principales funciones de un computador conocidas como: unidad central de procesamiento, memoria ROM y una pequeña cantidad de RAM. Diseñados comúnmente para aplicaciones

todo en uno, contrastando el uso de microprocesadores que son utilizados para usos más generales.

2.4.1 Memoria RAM

Las memorias RAM (por sus siglas Memoria de Acceso Aleatorio) permiten tener respuestas más rápidas, donde se ejecutan y guardan los datos e instrucciones que sean necesarias, además de ser ejecutadas se tengan almacenados los resultados.

Es la memoria donde se guardan las instrucciones temporalmente y los programas que están ejecutándose. En esta se almacenan los datos de los resultados, es decir si se está ejecutando los procesadores de textos, se encarga hacer las conversiones de pulsación del teclado y hacer la correspondencia y aparezca y poder verlo en la pantalla.

2.4.2 Memoria ROM

Las memorias ROM (Memoria de Solo Lectura). Como indica su nombre, es la memoria donde no se puede escribir nada, pues está grabada de fábrica. En un computador, se usa para guardar las indicaciones de arranque que son ejecutadas cuando es encendido el ordenador. Esta memoria es indispensable en toda clase de sistemas para tener una interfaz amigable para el usuario, sin esta es casi imposible tenerla.

2.4.3 Resolución en bits

Es una característica de los sistemas digitales que permite la transmisión de una cantidad de datos, es decir, de frases que es posible transmitir o el número de datos que se quieren dar.

2.4.4 Señales digitales

Son variables que se dividen en dos niveles que son drásticamente diferenciables, teniendo en cuenta que los niveles pueden tener valores de 1 o 0. Estos niveles transmiten información según una condición preventiva acordada.

La diferencia de niveles depende del dispositivo utilizado. Por ejemplo, la familia lógica de TTL (Lógica Transistor a Transistor), los niveles tienen una relación de 0V y 5V, pero hay rangos para dar como resultado estos dos niveles, teniendo de 0.8V interpretado correctamente como un 0 y mayor de 2.4V es interpretado como 1. para la familia de CMOS (Metal Oxido-Semiconductor Complementario). se debe tener una alimentación de +5V.

Una de las capacidades principales de las señales digitales es la capacidad de anular los ruidos en la señal.

2.5 Monitoreo y adquisición de datos

El monitoreo de las variables fisicoquímicas y de los contaminantes ha tenido como propósito evaluar la calidad del recurso hídrico a criterios como la preservación de la flora y fauna. (Inverman, 2018).

En este trabajo la medición será fundamental para llevar a cabo la investigación puesto que es necesario la realización de experimentos para obtener datos a través del sistema de adquisición de datos.

Para la adquisición y el monitoreo de las variables fisicoquímicas, es necesario el uso de sistemas capaces de lograr esto.

2.5.1 Transmisión

Existen dos medios por los que se puede realizar la transmisión de datos, de manera digital o analógica. Las señales digitales refiriéndose a bits de información pulsos y la que dé niveles de voltaje como lo antes visto anteriormente.

Dentro de los modelos de dispositivo que trabajan en el canal o banda de 2.4Gz. refiriéndose a las radiofrecuencias, ampliamente utilizados por su bajo consumo costo, los modelos más populares son el chip NRF24L01 (figura 7), existe otros que cuentan con amplificadores de potencia, antena SMA (Sub Miniature version A), además de amplificador LNA (Low Noise Amplifiers) permitiendo una distancia máxima de 1000m (figura 7), ambos se pueden usar como transceptores en distintos dispositivos microcontroladores.

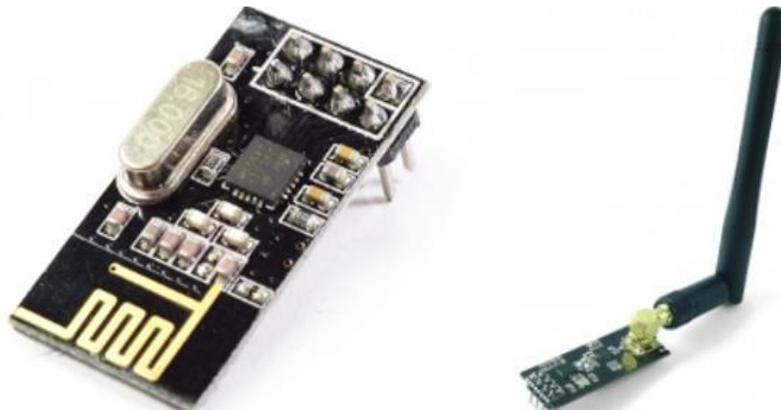


Figura 7. Diferentes modelos de chip NRF24L01 y modelo con antena SMA a la derecha.

<https://naylampmechatronics.com/blog/>

2.5.2 Comunicación WiFi

este tipo de comunicación es certificada por una organización de comunicación inalámbrica, transmisión que se hace por medio de ondas de radiofrecuencia. Se da por ondas y no por ningún tipo de cable directo para comunicarse. Específicamente utilizadas con la tecnología de internet, ampliamente utilizada en todo el mundo. (Wi-Fi Alliance, s.f.).

Esta comunicación tiene diferentes protocolos las que a lo largo del tiempo han cambiado gracias a su utilización de dispositivos que utilizan este protocolo, en la siguiente tabla (tabla 2) se identifican las principales diferencias de estos protocolos y su variación de transmisión de Mbps o Gbps (Mega - Gigabit bits por segundo).

Tabla 2. *Diferencias entre protocolos Wi-Fi*

Características de protocolo Wi-Fi.	
Wi-Fi 4	<ul style="list-style-type: none">• Nombrado 802.11n.
Wi-Fi 5	<ul style="list-style-type: none">• Conocido como 802.11ac.• Con velocidades de datos; 200 Mbps, 400 Mbps, 433 Mbps, 600 Mbps, 867 Mbps.
Wi-Fi 6	<ul style="list-style-type: none">• Nombrado 802.11ax.• Velocidad des de 6,9 Gbps.• Mayor numero conectados a una misma red y mejor eficiencia energética.

2.5.3 Protocolo de comunicación One Wire (1-Wire)

Esta comunicación en serie creada por Dallas Semiconductor. Es basada en bus, con un maestro y esclavos en una sola línea de datos para alimentar y utilizan para la transmisión de datos mostrado en la figura 8. En este proyecto se utilizarían los dispositivos DS18B20 con este protocolo con posibilidad de agregar más.

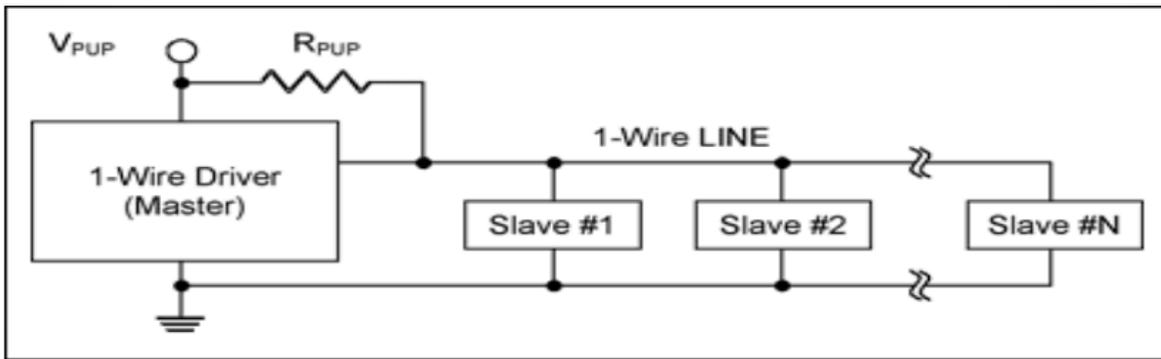


Figura 8. Diagrama esquemático de conexión maestro varios esclavos de protocolo One wire, [https://web.fdi.ucm.es/posgrado/conferencias/modelado_y_analisis_formal_del_protocolo_de_comunicación_de_sensores_One_wire](https://web.fdi.ucm.es/posgrado/conferencias/modelado_y_analisis_formal_del_protocolo_de_comunicacion_de_sensores_One_wire).

Cada uno posee un número de identificación, único que no puede ser cambiado (64 bits).

A grandes rasgos se ejecuta en las siguientes etapas:

1. Reset/Sincronización de dispositivos.
2. ROM Command, seleccionar un dispositivo.
3. Función con uno de los dispositivos (Memory Command).

2.6 Fuentes de alimentación

Para la fuente de alimentación se tomó en cuenta que el consumo energético mayor del dispositivo es la cuestión de calentamiento que permite hacer la toma de las diferencias de temperaturas.

De acuerdo con lo anterior, se debe hacer un cálculo del consumo de la resistencia donde se va a inducir la temperatura. De esta manera se puede deducir lo siguiente:

Se debe hacer el cálculo del consumo de la resistencia donde se va a incluir la temperatura para el sistema. De este modo se entiende lo siguiente:

$$\frac{wh \cdot 1000}{v} = mAh$$

$$\frac{8w \cdot 1000}{12v} = \frac{2000}{3} mAh$$

Donde: Wh, Vatios hora, V, voltaje, mAh, miliamperios hora.

Tabla 3. *Consumo de corrientes por componentes*

Componente	Características
Elemento calefactor	600-800 mA/h
Atmega328p	200-500 mA/h
Total	800-1300 mA/h

Estos son los principales componentes que requieren la mayor parte del consumo de corriente para el caso de la utilización de la placa de desarrollo STM se considera el consumo con la utilización de alimentación externa como se ve a continuación en la tabla 4, donde los pines y nombres de puertos se encuentran en el manual de usuario que se encuentra en los anexos de este documento.

Tabla 4. *Fuente de alimentación externa*

Nombre del puerto de alimentación	Pin o conector	Rango de voltaje	Corriente máxima	Limitación
VIN	CN6 pin 8 CN7 pin 24	7V a 12V	800mA	Para 7-12 v la capacidad de corriente depende de la entrada de voltaje: 800 mA corriente de entrada cuando Vin=7V 450 mA cuando 7v < Vi (< o = 0) 9V 250 mA cuando 9V < (< o =) 12V
E5V	CN7 pin 6	4.75V a 5.25 V	500mA	

Fuente: *adaptado de STM32-Nucleo-boards-User-Manual_ST.pdf*

La capacidad de la batería idealmente es de 10 a 11 horas para poder medir como mínimo un día entero de velocidad de flujo de savia. Por esta misma razón se requiere que la batería tenga una capacidad más alta de la que es necesaria. La batería tiene capacidad de 1500mAh, considerando que la temperatura no esté siempre activada, consumiendo al menos de 5 minutos cada hora lo indicado para este método.

La regulación de este consumo este dado por la unidad de PWM (Modulación de ancho de Pulso) de la misma placa de desarrollo y con conexión a una fuente externa de 12V regulada por una unidad de potencia esta parte es muy importante ya que de otra manera no se podría suministrar la temperatura requerida.

2.7 Métodos de medición de flujo de savia

En esta sección se revisitan algunos de los métodos utilizados para la medición de flujo de savia cada método presenta diferentes características, pero están basados en los mismos principios de funcionamiento además que es importante verificar el funcionamiento y resultado de diferentes métodos para poder analizar los resultados y tener un punto de comparación con métodos ya probados.

2.7.1 Método THB

Método de balance de calor del tronco caracterizado por calentamiento eléctrico directo y la detección interna de la temperatura fueron originalmente diseñado para árboles grandes (Čermák y Deml 1974; Čermák et al. 1973, 1976, 1982; Kučera 1977; Kučera et al. 1977).

Una sección del tronco de un árbol grande se calienta desde el interior mediante una corriente eléctrica (suministrada por electrodos) que pasa a través de los tejidos. El calor se libera de manera más uniforme. dentro del tejido de la xilema y no pasa la corteza gruesa. Tanto la

potencia (P-que es directamente proporcional al flujo de savia) o la diferencia de temperatura (dT-indirectamente proporcional) se puede mantener constante mediante circuitos electrónicos, mientras que la otra variable se registra.

Otras formas de poder control (por ejemplo, como cambios en la hora del día) puede traer errores significativos debido al almacenamiento de calor en los tejidos vegetales. Los electrodos, es decir, placas de acero inoxidable (generalmente 25 mm de espesor) y 1 mm de espesor son instaladas a distancias cortas (alrededor de 2 cm) en aproximadamente la profundidad de la albura (por lo tanto, son de diferente longitud). Se insertan en paralelo en la albura manteniendo el electrodo central en forma radial dirección relativa al tronco del árbol, coincidente con el flujo de savia.

Este método calcula el balance de calor de un determinado espacio calentado. Básicamente, la energía de entrada tiene que dividirse entre las pérdidas de calor por conducción y el calentamiento del paso del agua, de acuerdo con la simple ecuación siguiente:

$$P = Q dT cw + dT \lambda \quad (1)$$

Donde P es la potencia de entrada de calor (W), Q es el caudal de savia ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), dT es la diferencia de temperatura en la medición punto (K), cw es el calor específico del agua ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) y λ es el coeficiente de pérdidas de calor desde el punto de medición (W K^{-1}).

2.7.2 Método HFD

El método HFD (Método de Deformación de Campos de Calor), como su nombre lo indica, es basado en la medición de la deformación del campo de calor alrededor de un calentador lineal en forma de aguja, insertado en una radial dirección en el tallo. La vista frontal del

campo de calor parece como una elipse simétrica (debido a las diferentes conductividades térmicas del vástago k_{st} en las direcciones axial y tangencial bajo flujo cero y obtiene una forma de prolongación del elipsoide deformado bajo flujos crecientes). (El tallo debe ser considerado como un material complejo compuesto por xilema sustancia sólida, agua y aire). La idea del método surgió en 1991, cuando trabajaba con los sensores de "índice de flujo de savia" (Nadezhdina 1989, 1992,1999), y aplicado a manzanos (N. Nadezhdina 1998).

Este método en particular es en el que se basara esta investigación debido a que es uno de los métodos más completos y con mayor base para la utilización en diferentes árboles frutales además que se tiene diferentes variantes fórmulas que pueden ser utilizadas y explicadas.

$$q_1 = 3600D_{nom} \frac{(K+dT_{s-a})}{dT_{ax}} \cdot \frac{z_{ax}}{z_{tg}} \quad (2)$$

Dentro de las ecuaciones que se requieren para este proyecto se encuentra la ecuación (2) mostrada anteriormente, que posteriormente será utilizada para realizar los cálculos por medio de una interfaz gráfica.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

En esta sección está dividida en dos partes, en la primera se describen las características que posee los dispositivos utilizados, como segunda parte se describe los componentes y el método utilizado para la realización de la medición de la temperatura y el análisis de los datos obtenido de la nube.

3.1 Diseño base del dispositivo.

Para el diseño base se debe considerar las entradas, salidas, funciones y tareas que el dispositivo desempeña pues en base a sus características se tomará la decisión de los componentes que estos cumplan, si esta pose un costo beneficio que se busca cumplir a partir de la comparación de uno o más componentes que cumplan con la función o funciones requeridas. En base al diagrama de funciones se podrá verificar que cada elemento cumpla con la tarea que debe llevar a cabo, posteriormente se describirán las características de cada componente y así verificar que este proporciona una solución y no existe otro elemento con las mismas características que pueda llevar a cabo las mismas funciones.

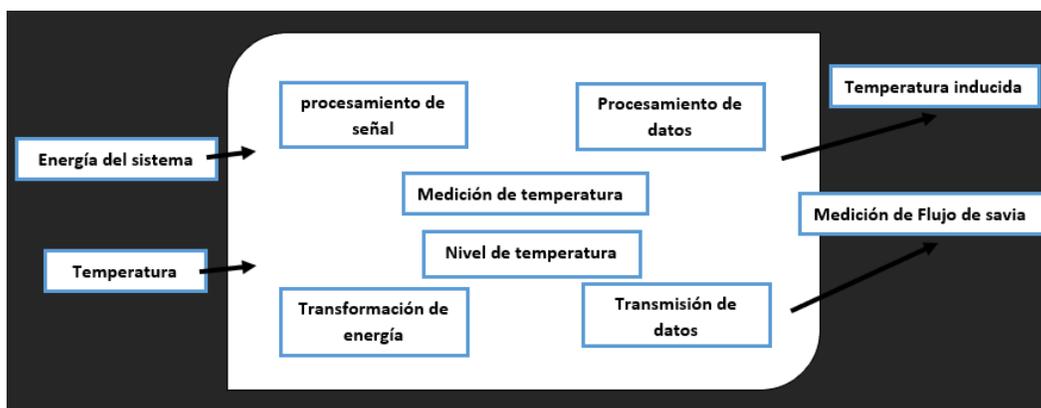


Figura 9. Diagrama de funciones generales del dispositivo de medición, autoría propia,

2023.

Luego de verificar la problemática y como se muestra en el diagrama de funciones es posible encontrar diferentes respuestas que pueden cumplir cada una de las funciones, pero solo una para obtener estas soluciones con las que se puede elegir la más viable tomando en cuenta los pros y contras tanto de ventajas como desventajas y si también el costo que llegara a tener para poder desarrollar el dispositivo.

Enseguida se realiza con el fin de seleccionar la mejor opción para realizar el proyecto dependiente de las funciones que debe desempeñar.

En la siguiente cuadro de comparación se presentan las diferentes propuestas para la configuración, donde se presentan en fila las funciones a cumplir dadas por el diagrama de funciones y en las columnas las propuestas de la configuración para cumplir con el mismo además de una breve definición de la función que desempeña, si presenta un costo elevado y así como también algunos de los principales ventajas y desventajas para cada caso, las propuestas se presentan en tres diferentes niveles que se describen a continuación.

Nivel**Definición**

I

Se cumple con la función requerida además de contar con ventajas que por su costo la hacen la opción más aceptable.

II

En este nivel se puede cumplir con objetivos iguales y características con facilidad de adquisición.
--

III

Presenta exigencias ya sea de software o hardware superiores a los niveles superiores, pero es posible como una variante a los primeros niveles.
--

3.2 Tabla de comparación de componentes.

La matriz de comparación de componentes, se realiza con el objetivo de elegir los componentes para la realización de este proyecto con respecto a las necesidades del mismo, para así comparar sus características y el costo beneficio de las mismas.

Esta es una parte importante del proyecto puesto que uno de los objetivos es implementar dispositivos de última generación de bajo coste y que sean de fácil adquisición por lo cual es importante verificar cada componente con su respectivo coste beneficio.

Tabla 5. Comparación de componentes del dispositivo medidor.

	Propuesta I	Propuesta II	Propuesta III
Procesamiento de señales	<p>Raspberry pi: Es una placa computadora de bajo costo, usualmente se utiliza para aplicaciones estudiantiles.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Gran poder de procesamiento ● Disponibilidad comercial. ● Amplia variedad de librerías disponibles. <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Alto costo ● Pines GPIO más delicados. ● No está diseñado para controlar. 	<p>Microcontrolador con una memoria de programación de 32Kbytes.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajo costo. ● Fácil uso. ● Amplia variedad de librerías disponibles. ● Diseñado para controlar. ● Disponibilidad comercial. 	<p>(STM32-Nucleo-boards-User-Manual_ST.pdf)</p> <p>Ofrece a los usuarios una forma asequible y flexible de probar nuevas ideas y crear prototipos con cualquier microprocesador STM32. ideas y construir prototipos con cualquier línea de microcontroladores STM32, eligiendo entre las diversas combinaciones de rendimiento, consumo de energía y características.</p> <p>El Arduino™</p>
Almacenamiento de datos	<p>NUBE: Capacidad de guardar datos en servidores pagados.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Acceso remoto a la información ● Cantidad “ilimitada” de almacenamiento o ● Datos persistentes <p>DESVENTAJAS:</p>	<p>MEMORIA INTERNA: La memoria interna del microprocesador con la capacidad específica del mismo.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Ningún costo adicional <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Espacio de almacenamiento muy limitado ● Memoria no persistente 	<p>Micro DS Memoria hasta de 128 gigabytes con medidas pequeñas.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Gran cantidad de almacenamiento ● Fácil implementación ● Disponibilidad comercial <p>Datos persistentes</p> <p>DESVENTAJAS:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ● Requiere base de datos en la nube ● Requiere hardware y software de transmisión adicional ● Mayor costo 	(perdida de datos si no está conectado a la fuente)	<ul style="list-style-type: none"> ● Requiere hardware y software adicional
Transformación de energía	<p>Batería Ion de Litio: Es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía, que usa sal de litio como electrolito y así generar una reacción electroquímica reversible para obtener un ánodo y un cátodo.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Alta densidad energética <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● El costo de este es muy alto para su funcionalidad. 	<p>Baterías níquel ioduro: Son baterías que poseen una alta densidad de energía, lo cual tienen un tiempo de vida mayor.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Alta densidad energética <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Poco amigables con el medio ambiente ● Tiene un peso alto. 	<p>Son baterías de polímero litio que poseen una excelente relación, calidad / precio, por eso son más usadas en aplicaciones con motores.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Alta densidad energética ● Disponibilidad comercial ● Diseñada para alto amperaje. <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Necesitan un protocolo de carga. ● Tiene un nivel máximo de descarga antes
Elemento calefactor	<p>Resistencia: Resistencia de 50 ohm con 1.5W. Geometría final plana.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Diseñada para calentar 	<p>Resistencia de Impresora 3D a 40W: Resistencia cerámica de 12 voltios con geometría final redonda.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● disponibilidad comercial. ● Diseñada para calentar. 	<p>Resistencia: Resistencia de precisión de 1 ohm con 1W. Geometría final plana.</p> <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Disponibilidad comercial. <p>DESVENTAJAS:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ● Bajo costo comercial ● Disponibilidad comercial <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Geometría plana 	<ul style="list-style-type: none"> ● Geometría perfecta para la aplicación. ● Altos vatios. 	<ul style="list-style-type: none"> ● No diseñada para calentar. ● Dificultad de implementación.
--	---	---	---

3.3 Módulo de medición.

El módulo de medición consta de un microcontrolador STM 32F411 Núcleo-64[®] con un Microcontrolador de 32 bits ARM Cortex-M4 conectado a los sensor digital DS18B20, en este caso dos sensores alimentados a 5 volts, un cartucho calefactor conectado a un módulo de potencia MOS alimentado de forma independiente, por otra parte se encuentra el módulo NRF24I01, este es el encargado de la comunicación inalámbrica punto a punto mediante radiofrecuencia directamente al receptor encargado de cargar los datos a la nube para su posterior procesamiento. Para su protección este módulo se integra a un gabinete de plástico rígido con protección para polvo y agua con medidas especificadas de 158 x 90 x 60mm (figura 10).



Figura 10. Gabinete protector del módulo de medición, autoría propia, 2023.

El prototipo del módulo emisor y receptor armado con todos los componentes se muestra a continuación (Figura 11) , es la base con los componentes más adecuados tomados de la tabla 5 de comparación de componentes.

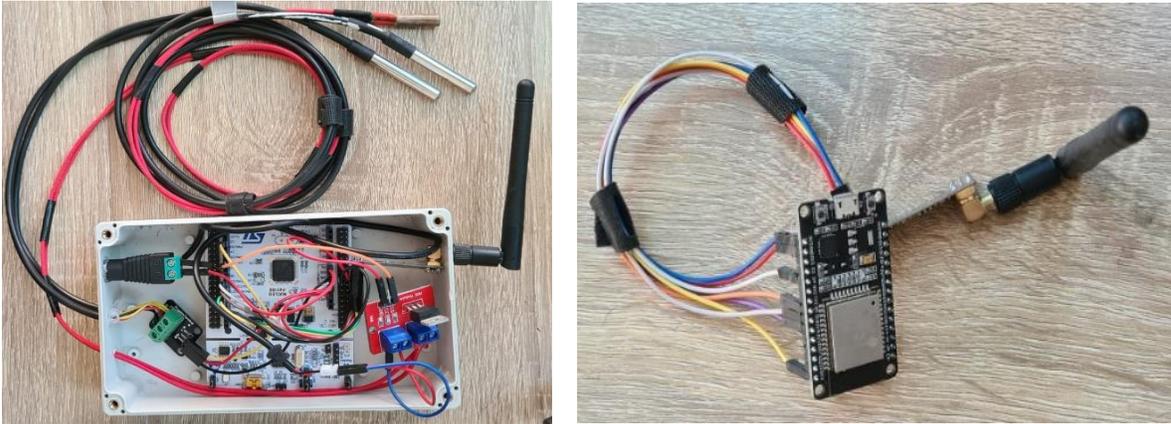


Figura 11. Prototipo de módulo de emisión y recepción respectivamente, autoría propia, 2023.

3.4 Modelo e impresión 3D

3.4.1 Montura para gabinete del módulo emisor

Algunos componentes fueron diseñaron para tener un soporte adecuado para montar el medidor al árbol de modo que este en una posición adecuada y no tener problemas a la emisión de los datos, este fue diseñado a partir de las medidas del gabinete utilizado para proteger el módulo emisor.

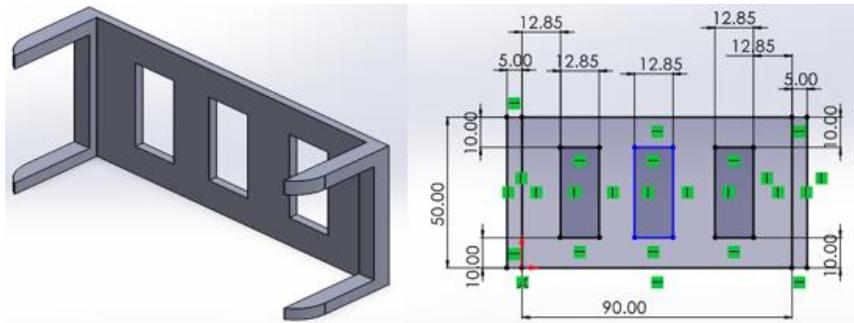


Figura 12. Diseño de soporte para gabinete emisor, autoría propia, 2023.

3.4.2 Caja protectora de cartucho calefactor y sensores.

Para los sensores de temperatura se decidió diseñar un soporte para evitar interferencias debido a la influencia del ambiente de modo que estas sondas quedaran aisladas del ambiente, este fue impreso con filamento ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato) que proporciona mayor resistencia a diferentes condiciones ambientales, las dimensiones de cada encapsulado de los sensores, así como de las medidas del cartucho calefactor ilustrado en la figura 13.

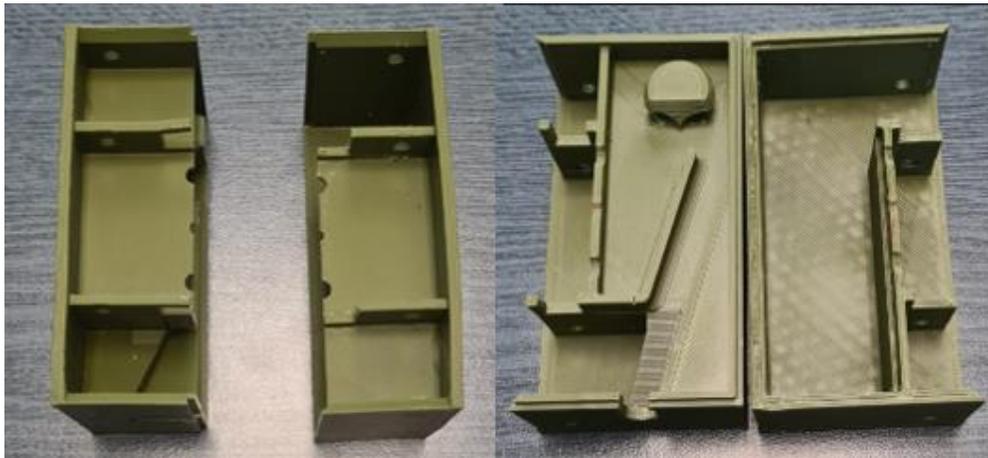


Figura 13. *Caja protectora de modulo emisor, autoría propia, 2023.*

3.4.3 Caja protectora de dispositivo receptor.

Para el módulo emisor se imprimió un modelo de caja protectora para el manejo de la tarjeta esp32 está basada completamente en las medidas de la tarjeta esp32 y del módulo NRF para poder conectar el cable micro USB para poder alimentarlo y en caso de ser necesario ajustar las características de la programación, impreso en filamento ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato-nitrilo) por sus características de mayor mostrado en la figura 3.2 del diseño impreso.

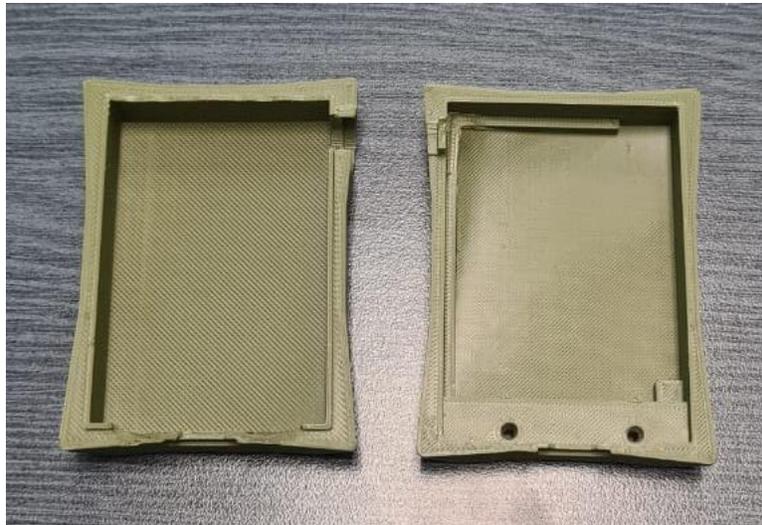


Figura 14. *Caja protectora del módulo receptor con filamento ASA, autoría propia, 2023.*

3.5 Pruebas de funcionamiento

Para las pruebas de funcionamiento se realizó una prueba sencilla de tres etapas en la que los sensores se introducen en una espuma porosa de poliuretano capaz de absorber agua, estas pruebas se realizaron a una distancia de un centímetro de distancia del elemento calefactor colocado a la mitad de un bloque de 23cm de altura por 10cm de profundidad y 9cm de espesor, como primera etapa se registró la respuesta de los sensores dentro de la espuma sin mojarla posteriormente se forzó el flujo de agua desde la parte superior hasta que quedara completamente mojada y por último se realizó la medición fuera de la espuma retirado los dos sensores del elemento calefactor esta respuesta fue registrada y los datos se graficaron para su análisis mostrando la respuesta en la gráfica diferencias de temperatura (Figura 15).

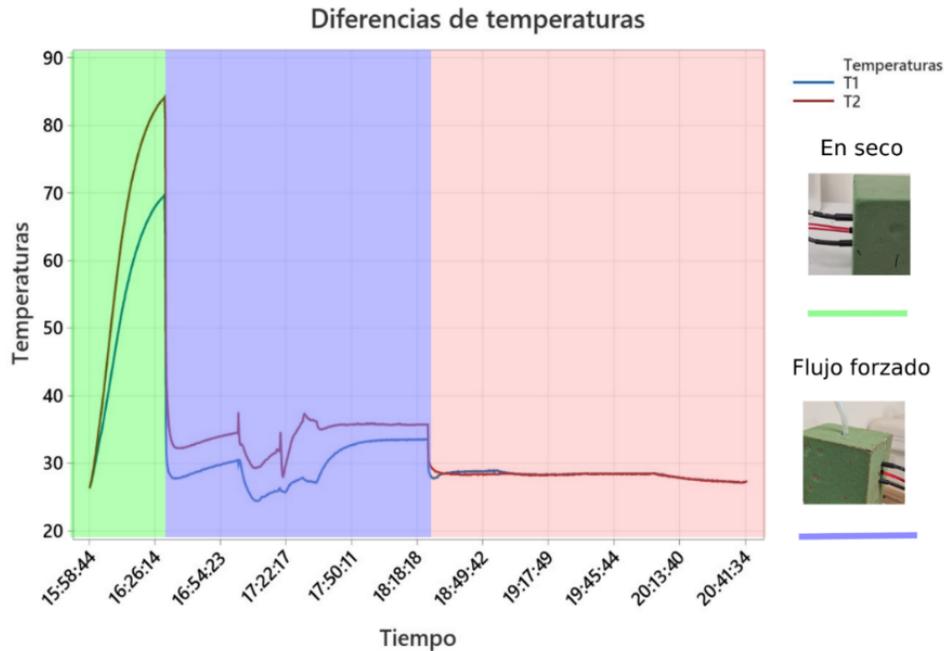


Figura 15. *Grafica de funcionamiento en tres etapas, insertado en seco, con flujo de agua y a temperatura ambiente, elaboración propia, 2023*

En esta sección se realiza la calibración por el método de comparación haciendo las mediciones en diferentes puntos y utilizando un termómetro digital calibrado como el instrumento patrón, al comprobar la desviación entre el instrumento patrón y cada termómetro (Figura 16) se puede hacer el ajuste mediante software directamente en el programa del microcontrolador.



Figura 16. *Termómetro patrón digital para calibración de sensores y sensores DS18B20 respectivamente, autoría propia, 2023.*

3.6 Programación de dispositivos

En el código cargado en el dispositivo emisor de datos se desarrolla en el ambiente de programación de Arduino® se crea el ajuste para el envío de datos, en la sección de configuración se establece un arreglo llamado “*MyData*” dentro de este se define dos variables que corresponden a los sensores de temperatura, definidas como temperatura 1 y temperatura 2, estas temperaturas son tomadas por los sensores digitales ds18b20, es posible leer cada sensor conectados a una misma conexión debido al protocolo de comunicación “*Onewire*” y es posible acceder a la información de cada sensor gracias a la librería “*wire*” para ajustar la medición de cada sensor a la misma temperatura y después transmitir los datos al receptor que será cargados a la plataforma en la figura anterior se puede apreciar en la sección rosa como a temperatura ambiente se equilibra la temperatura y cada sensor tiene la misma medición para reducir la variación de esta manera reducir el error de la medición.

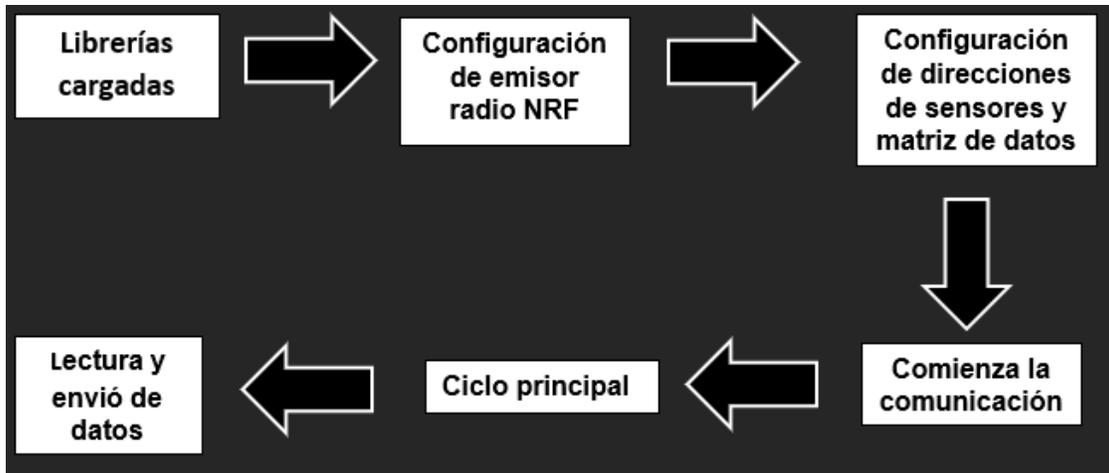


Figura 17. Diagrama de bloque de código del dispositivo emisor, autoría propia, 2023.

Para el código receptor se emplea un procedimiento similar donde se cargan las librerías a utilizar para poder emplear la tarjeta de comunicación Wi-Fi que este tiene integrado y también la comunicación de radiofrecuencia con la antena de receptora, posteriormente se configuran las credenciales de la red a utilizar empleando la dirección SSID y contraseña de la red, hecho esto se configuran los parámetros de la matriz de datos para la recepción de estos junto a la configuración los sensores y de los configuraciones principales de la antena receptora, luego se inicia el ciclo principal donde inicia la recepción de los datos del transmisor se imprimen los datos entrantes en el puerto serial y finalmente ser cargados a la plataforma en la nube mediante post para poder ser almacenados y visualizados en la plataforma Thingspeak™.

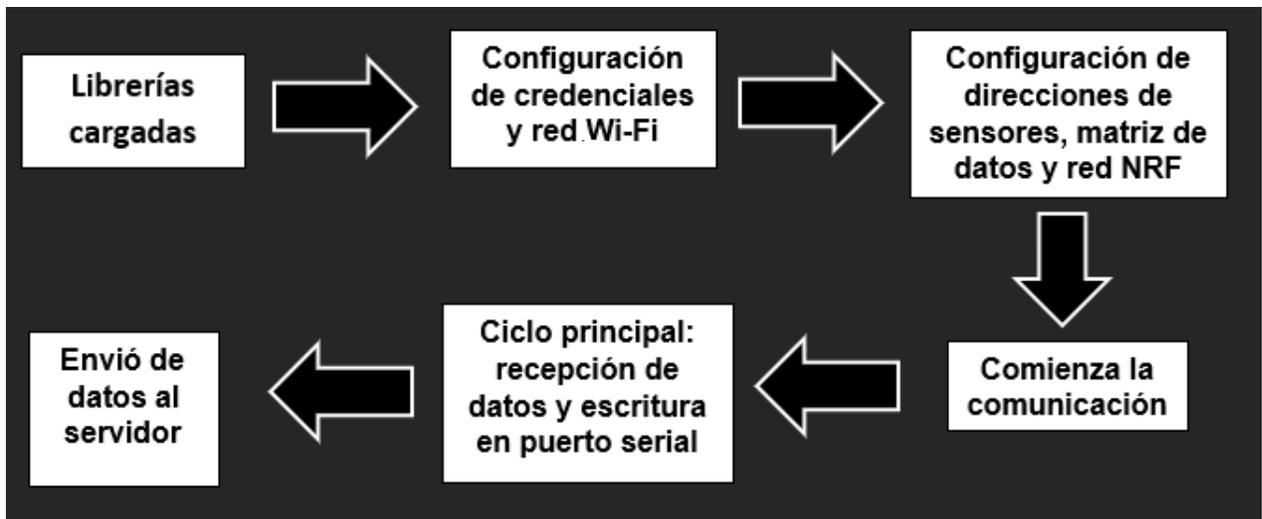


Figura 18. *Diagrama de bloques del código receptor, autoría propia, 2023.*

3.7 Interfaz gráfica

Para poder realizar una interpretación correcta de la información se realizó una interfaz gráfica con el objetivo de introducir en la base de datos de la nube y este archivo poder convertirlo en una tabla y posteriormente poder realizar las operaciones por medio de software para obtener los datos de flujo de savia todo esto realizado con Python con la interfaz Visual Studio, para fines prácticos esta interfaz solo se encarga de realizar las operaciones debidas a los datos recabados y presentarlos de forma gráfica para su posterior interpretación.



Figura 19. *ventana principal del programa para graficar datos separados por coma (CSV.), autoría propia, 2023.*

Como se puede observar en la imagen (figura 19) se tiene una interfaz con dos botones en la parte derecha con la etiqueta graficar con la función de seleccionar el archivo a procesar y graficar los datos seleccionados presentando de lado izquierdo la ubicación del archivo seleccionado y del lado derecho un botón para cerrar la ventana de a interfaz, cabe mencionar que solo presentara un resultado si el archivo seleccionado corresponde al formato especificado en la programación.

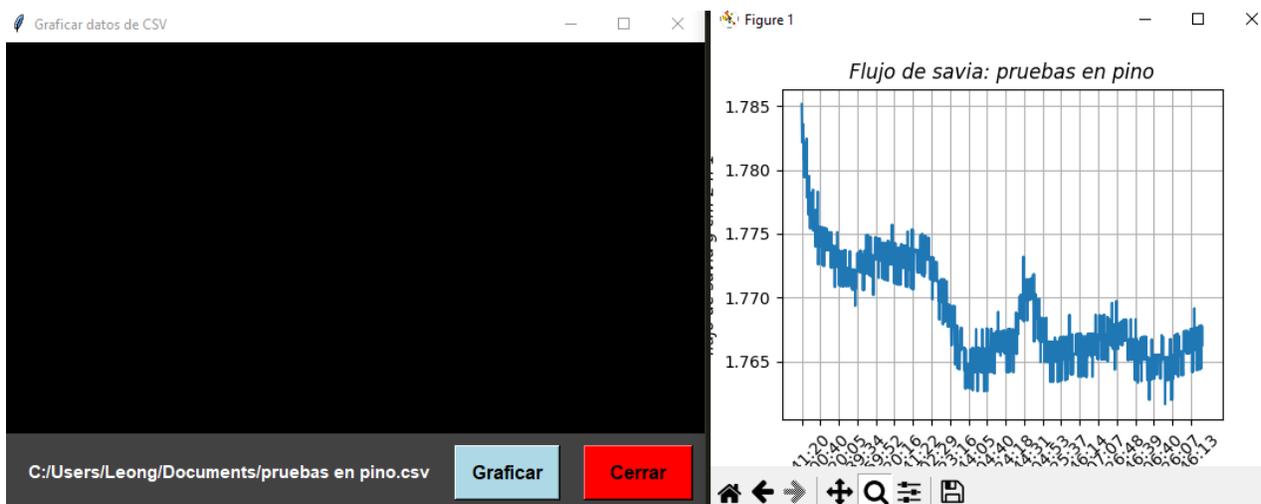


Figura 20. *Interfaz con datos graficados, autoría propia, 2023.*

3.8 Pruebas de funcionamiento

Las primeras pruebas se realizaron para comprobar el funcionamiento de la red punto a punto y la configuración de comunicación wifi, así como el correcto funcionamiento de la plataforma de. Se instaló el módulo emisor a una altura de 2 metros de la base del árbol con perforaciones de 5mm y 30mm de profundidad a 25mm de distancia entre el cartucho calefactor y ambos sensores, la primera parte de la comunicación se da en la conexión de radiofrecuencia de la NRF24101 configurando la dirección de emisor y receptor con la misma clave para recibir los datos todo esto se carga en el microprocesador, en el caso del receptor se configuran los datos de red, la llave de acceso y canal de usuario que serán cargados a la plataforma para su visualización de manera gráfica.

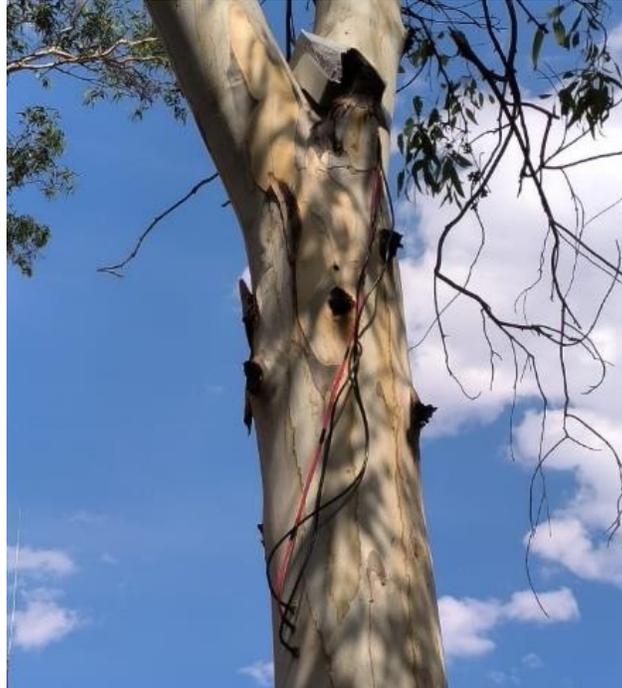


Figura 21. Instalación en árbol de eucalipto, UPIDET, TECNM/IT Durango, autoría propia, 2023.

En la plataforma Thingspeak™ se pueden visualizar por medio de graficas la medición de ambos sensores de manera automática gracias a la conexión con Wi-fi se puede cargar los datos y mantener almacenados los datos además de que es posible acceder a los datos de manera que se almacenan los datos y es posible descargar esa base de datos.

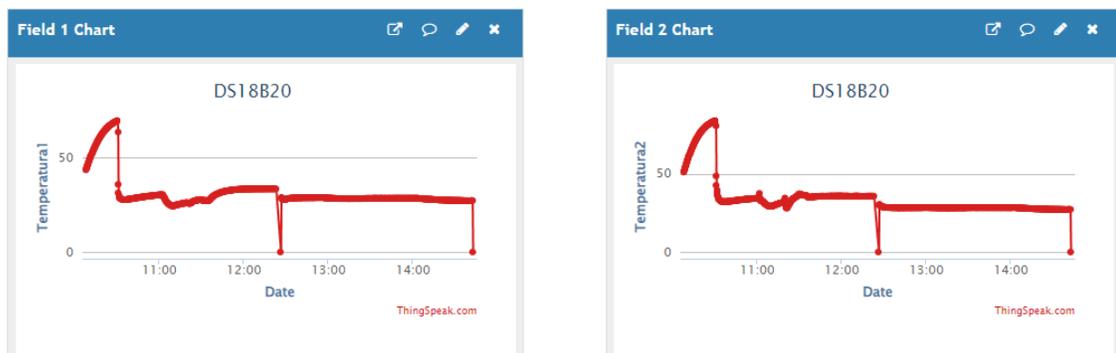


Figura 22. Graficas de sensores en la plataforma Thingspeak™, <https://thingspeak.com/>, 2023.

3.9 Características del cultivo

Cada cultivo, responde al manejo del riego en forma especial. Ya que sus características morfológicas y fisiológicas son también diferentes. En el manzano es necesario conocer características del sistema radicular, del follaje, de los distintos estados fenológicos, para así conocer su comportamiento al manejo del riego.

3.9.1 Características del suelo

En el manejo de riego en todos los cultivos, las características del suelo son fundamentales, especialmente en métodos de riego gravitacionales.

El suelo está formado por una fase líquida, una gaseosa y una sólida, la primera, compuesta por el agua, la gaseosa está dada principalmente por los poros y la sólida, por partículas de arena, limo y arcilla.

La proporción en que se encuentran estas partículas sólidas determina la textura de un suelo. La estructura, por su parte se refiere a la disposición de estas partículas. Ambas son muy importantes en la planificación del riego del cultivo.

En general en texturas más arcillosas, el agua infiltra con más dificultad en el suelo, por lo tanto, se necesitará mayor tiempo de riego para que penetre a la profundidad de las raíces en el suelo. En cambio, en los suelos arenosos el agua infiltra rápidamente.

El suelo presenta diferentes características físicas e hídricas que influyen en el número de riegos que se deben dar al huerto, de esta manera se hace fundamentalmente que el agricultor conozca las diferencias entre los distintos tipos de suelo, para que así planifique adecuadamente el riego del manzano.

Los parámetros físico-hídricos del suelo permiten conocer su capacidad de almacenamiento de agua y así determinar el tiempo transcurrido entre cada riego. En términos generales los suelos trumaos retienen mayor volumen de agua que los arenosos y arcillosos, por lo que, para similares condiciones de clima y cultivo, los suelos arcillosos y arenosos deben ser regados con mayor frecuencia que los trumaos.

3.9.2 Características del clima

De acuerdo con el INEGI el clima predominante es de tipo templado y seco, presente en forma de franjas en sentido suroeste-noreste. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

El clima dominante en la mayor parte de la superficie es un clima semiárido templado con verano cálido; con zonas de meses de lluvia máxima presentes en junio y septiembre con 70 y 80mm. Presenta con régimen de lluvias en verano, Los componentes más importantes del clima desde el punto de vista del riego, son los aportes y pérdidas de agua, que se conoce a través del balance hidrológico de un área determinada conociendo las lluvias y las evaporaciones de agua.

Los componentes más importantes del clima desde el punto de vista del riego, son los aportes y pérdidas del agua, que se conocen a través del balance hidrológico de un área determinada conociendo las lluvias y las evaporaciones de agua.

Por un lado, las precipitaciones específicamente en esta región, se determinaron valores de temperaturas y precipitación media anual de 16.2°C y 471.8mm respectivamente. igualmente, se obtuvo un valor de 1,685 mm anuales, de evaporación potencial.

Por otra parte, la evapotranspiración de agua permite indicar, el agua que se está perdiendo del suelo, lo que se relaciona directamente a las necesidades de agua de las plantas.

Existen variadas formas de determinar las pérdidas de agua desde el suelo, una de ellas es a través de una bandeja de evaporación de sección circular y dimensiones conocidas con agua en su interior, el agua que se ha perdido de la bandeja, en un periodo de tiempo determinado, corresponde al valor de evaporación de bandeja, en el caso de esta región con valores anuales de 1,685 milímetros.

En el cuadro x se muestran los registros de las precipitaciones correspondientes a los meses en los que se tiene una mayor cantidad que son entre los meses de agosto y julio, tomando en cuenta estas precipitaciones los niveles de evaporación y el balance hidrológico anual, es decir la diferencia entre las lluvias y la evaporación en ese sector de la región este balance será positivo cuanto menor sea la diferencia y negativo conforme se incremente la diferencia entre las precipitaciones y la evaporación.

3.9.3 Sistema Radicular

El sistema radicular, es la estructura por la cual la planta absorbe el agua y nutrientes para su crecimiento, siendo entonces de primordial importancia para el manejo del riego.

La gran mayoría de los cultivos presentan una mayor concentración de raíces en la zona superficial, lo que, aunado a la evapotranspiración, hace que la parte superficial permanezca relativamente seca durante todo el tiempo.

Las raíces para crecer y desarrollarse, necesitan oxígeno y humedad de suelo, de otra manera el cultivo presentará un restringido volumen radicular que no permitirá que el árbol mostrar su potencial productivo.

Los suelos de textura fina (arcillosos), tienen un reducido número de poros, por ende, una pobre aireación, esta condición genera un volumen radicular muy pequeño, con respecto a

los suelos trumaos los suelos arenosos, presentan una aireación bastante alta, pero es difícil mantener la humedad del suelo, lo que también incide en una baja masa radicular.

En los manzanos se ha encontrado una correlación positiva entre el diámetro del tronco y a la profundidad que explora el sistema radicular.

En términos generales cuando el cultivo ha alcanzado un 50 a 60% de su desarrollo, el sistema radicular ya corresponde al 80% de su masa definitiva. En frutales el máximo desarrollo radicular coincide con el periodo de máxima producción.

El desarrollo de las raíces en manzano, alcanza hasta 6m en sentido lateral y 4m en profundidad, la forma que tomará dependerá fundamentalmente de las condiciones del suelo.

3.9.4 Sistema Aéreo

Hasta más del 90% del agua absorbida una planta, se pierde por la transpiración que realizan su hoja, un reducido porcentaje lo consumen.

En la determinación de los requerimientos hídricos de manzano, es fundamental conocer la cobertura vegetal de la de la planta, ya que arboles más grandes tendrán necesidades de riego también mayores. En la programación del riego del manzano, se debería considerar el área que sombrea el árbol, para la estimación de volumen a aplicar.

3.9.5 Secciones del tronco

La sección de la albura que se encuentra en la parte más externa después de la corteza es posible perforar con facilidad para insertar los sensores y cartucho de 6mm de diámetros 35mm de profundidad, como lo visto en la imagen.

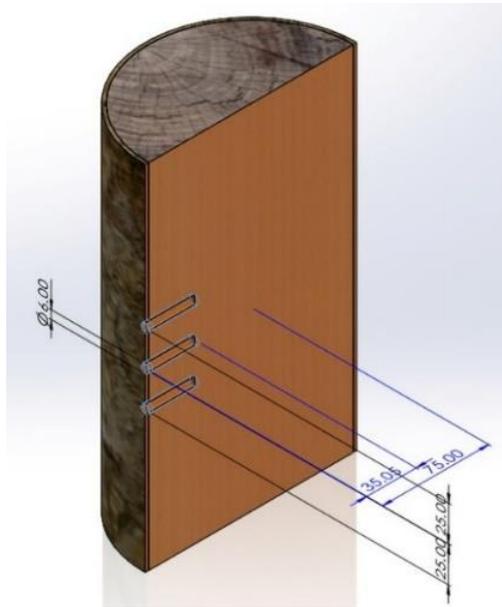


Figura 23. Simulación de tronco y perforaciones con sus dimensiones, elaboración propia, 2023.

- Madera o xilema: son un conjunto de células que conforman el tejido leñoso. En este se distinguen tres partes principales:
- Médula: encontrada en la parte central del tronco. Conformada principalmente por las células muertas o débiles, que a veces tiene consistencia corchosa. Sus diámetros pueden variar de milímetros, hasta mayor de un centímetro, esto dependiendo de las diferentes especies.
- Duramen: esta parte conocida como corazón, zona que rodea la medula, notablemente de un color más oscuro, con una formación de células muertas lignificadas proporcionando características de resistencia al ataque de insectos y hongos. La proporción de esta parte del árbol es dependiente de la edad de cada especie.
- Albura: De coloración clara y constituida de células jóvenes. tiene una menor resistencia a los agentes biológicos. Esta parte mientras es más abundante cuanto más joven es el árbol.

Para la medición del flujo de savia el área de interés es la Albura conformado en su mayor parte por células jóvenes además que es la parte encargada del transporte de savia bruta, que transporta sales minerales y agua.

Características de la madera de manzano: Dándole continuidad a las características de los manzanos; tiene una densidad aproximada de 0,5 Gr-cm, dureza de 28N/mm² de textura fina y uniforme, con duramen difícil de distinguir, alcanza los 35 metros de altura aproximadamente, así como un diámetro aproximado de 100cm. Con coloración parda, rojiza o marrón.

El duramen presente un color rojizo con líneas y remolinos de un color gris oscuro, castaño, azul, amarillo, o rojo.

La mayoría de los manzanos son propensos a tener pequeños nudos causando irregularidades.

3.9.6 Savia y sus características

Parte fundamental en general para cada una de las plantas es la savia conocida como la sustancia que se encarga de transportar a través del tejido conductor de la planta las diferentes sustancias necesarias para su desarrollo.

El contenido de la savia de una es de sales minerales, aminoácidos y hormonas. Sin embargo, compuesta por agua, hasta en un 98%, aunque este puede variando con la especie.

La savia que se encuentra en las plantas es de dos tipos:

Savia bruta: formada en las raíces y transportada por la xilema resto de la planta.

Savia elaborada: elaborada después de la fotosíntesis y transportada por el floema en sentido contrario de las hojas a la raíz.

La estrecha relación la transpiración y el flujo de savia, queda de manifiesto también en el hecho de que en los días nublados se produce una disminución importante en las medidas de flujo, disminución que responde sin duda alguna a un menor nivel de transpiración bajo esas condiciones climáticas.

3.9.7 Morfología de los manzanos

Tipos de manzanos:

Existen varios tipos de manzana como lo son; Golden Delicious (Deliciosa Dorada): el producto es voluminoso de color amarillo dorado, con pulpa blanca amarillenta, jugosa, perfumada.

Red Delicious (Deliciosa Roja): el fruto es de buen tamaño, de color rojo más o menos fuerte, con un punteado amarillo, pulpa azucarada, jugosa, ligeramente acidulada y muy aromática.

Starking: variación de la *Red Delicious*, el fruto es grande, cónico, con cinco lóbulos alrededor del ojo. La pulpa es amarilla, crujiente, de sabor muy agradable.

Richared: es una mutación de *Red Delicious*, el fruto es grande y más coloreado que los anteriores. La pulpa es crocante, fundente, jugosa y perfumada. Es una variedad productiva resistente a manipulaciones y transporte.

3.9.8 Necesidades de agua en huertos de manzano

En general, el riego consiste en la aplicación oportuna del agua requerida por el cultivo, minimizando pérdidas por el escurrimiento superficial y percolación profunda.

Determinar la cantidad de agua a aplicar en el manzano es prácticamente imposible, ya que se tendría que tener un control absoluto y estadístico de todas las variables involucradas que están interactuando en la transpiración de la planta y evaporación del suelo.

Por esto para poder determinar esta cantidad requerida de agua se puede hacer uso de los métodos de análisis de flujo de savia por medio de pulsos de calor ya que a pesar de las demás variables que presentan una de las principales medios por el cual se determina el consumo de agua es del proporcionado por el sistema radicular que independientemente del desarrollo es posible determinar una buena estimación de este a partir del análisis de tallos, raíces y tronco, y teniendo en consideración las otras variables es posible realizar una programación adecuada del riego.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Como parte de los resultados se muestra el prototipo funcional que es el utilizado para realizar las pruebas y mediciones en los diferentes arboles de prueba tomando en cuenta que para cada prueba se utilizó el mismo método descrito anteriormente estas pruebas dieron como resultado la obtención de los datos para la medición de flujo de savia, así como también como parte de la verificación de el correcto funcionamiento de cada componente y de los sistemas de comunicación, la propuesta del dispositivo final emisor con sondas y receptor se muestra en la siguiente imagen (Figura 24).

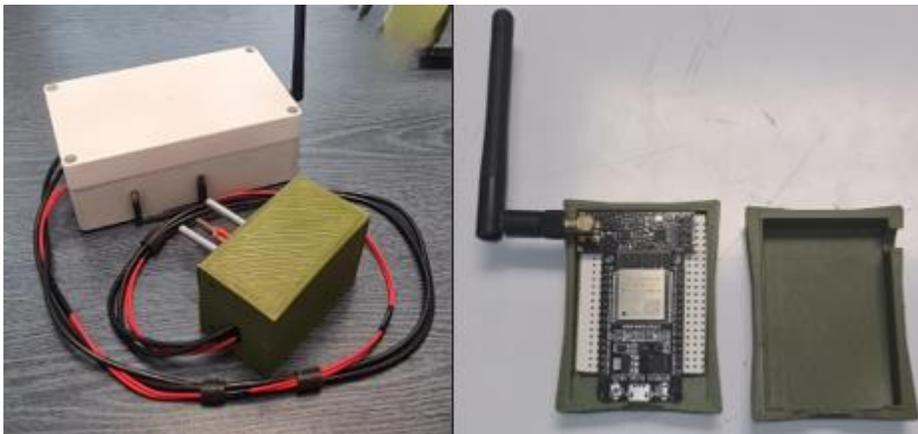


Figura 24. *Medidor de flujo de savia con protector de sensores y cartucho calefacto, receptor con carcasa protectora respectivamente, autoría propia, 2023.*

Todos los datos obtenidos en las pruebas se utilizaron para mejorar el sistema de recolección de datos y el funcionamiento de las de la comunicación inalámbrica.

Los datos pueden ser almacenados en un archivo valores separados por coma que puede ser procesado por la interfaz desarrollada para este análisis la cual proporciona una manera grafica para interpretar los datos y poder identificar la información relevante pudiendo

almacenar los datos relevantes para el productor como lo es el flujo de savia obtenido por y la gráfica que describe estos datos.

Para las primeras pruebas se realizó una medición continua de un árbol de eucalipto con un flujo constante de calor durante cuatro días durante los cuales dos de ellos se mantuvo la temperatura del cartucho activa y durante los dos siguientes se mantuvo apagado, dando como resultado la siguiente gráfica (figuras 25 -26) con la lectura de temperaturas.

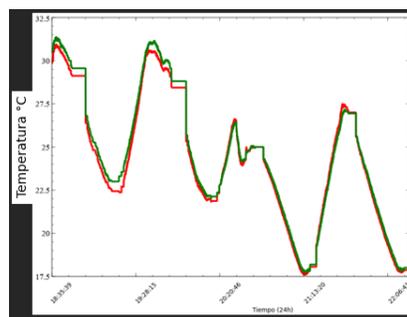


Figura 25. *Gráfica de sensores respuesta en °C con tiempo aproximado de medición, elaboración propia, 2023.*

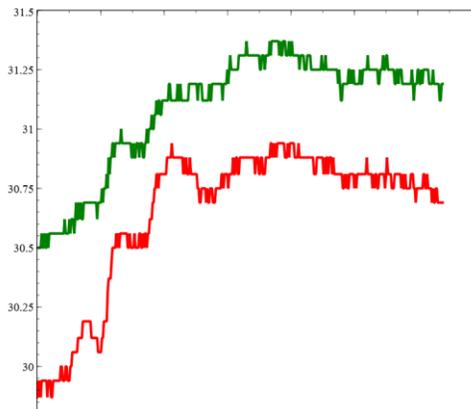


Figura 26. *Gráfica ampliación de respuesta de ambos sensores, temperatura con desfase de 0.5°C, elaboración propia, 2023.*

Con esta respuesta realizadas con una hoja de cálculos, al estar considerando la hora aproximada de la medición donde se puede observar la diferencia de los días donde se mantuvo la temperatura constante en comparación a los que estaba desactivado se observa un descenso considerable en el nivel de temperatura de aproximadamente 5°C entre las mediciones.

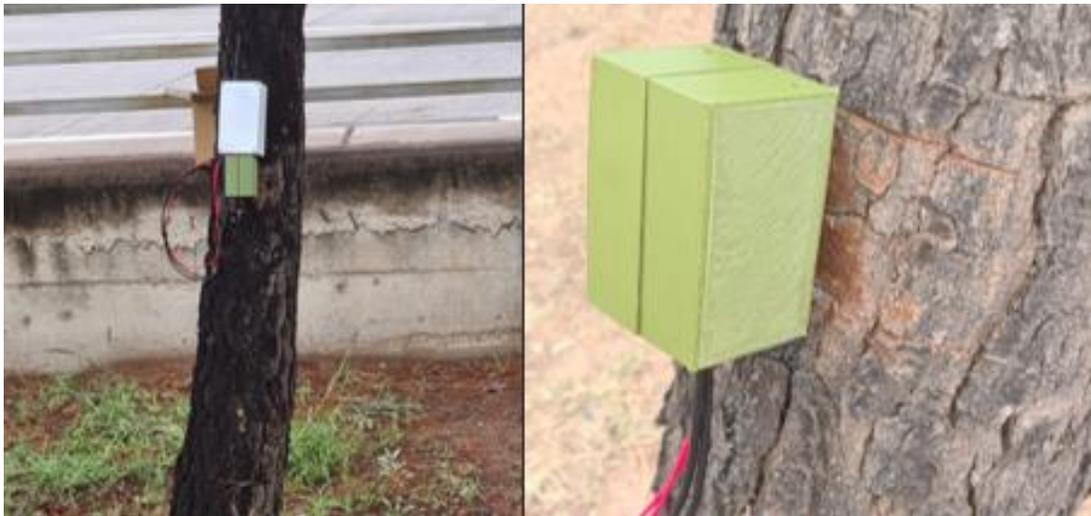


Figura 27. *Instalación de dispositivo en campo, árbol tipo pino, elaboración propia, 2023.*

Para las siguientes pruebas se realizaron en un árbol más joven a una altura de 1.5m de la base del árbol de tipo pino estas se realizaron durante el día obteniendo la siguiente gráfica (Figura 28).

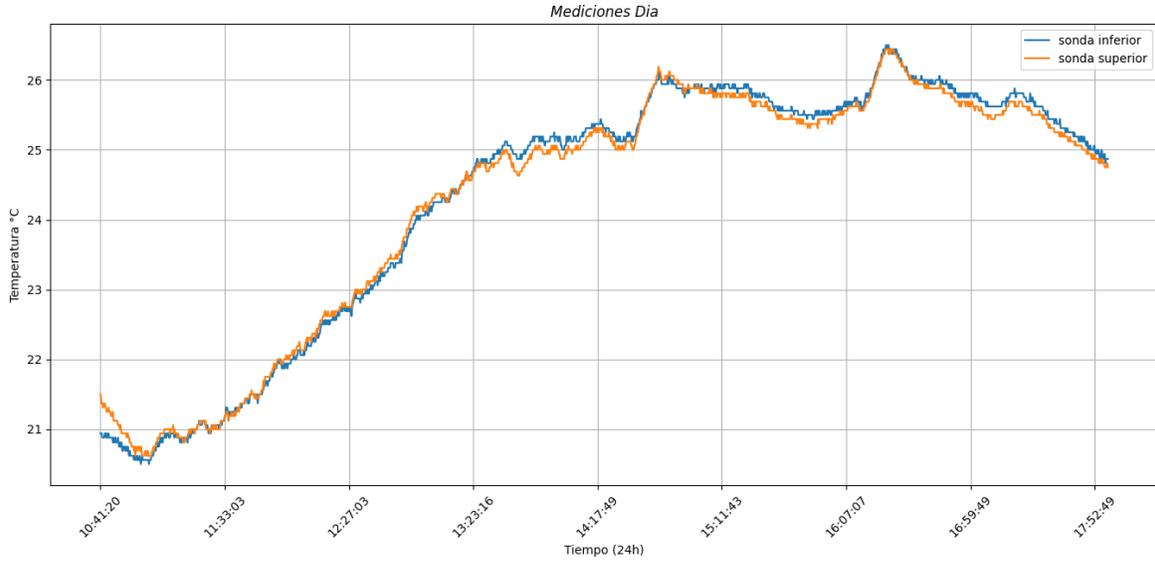


Figura 28. *Grafica de medición de sensores durante el día, en árbol tipo pino, tiempo de medición de 24 horas, elaboración propia, 2023.*

Como se puede ver en estos resultados en la gráfica (Figura 28) se observa una tendencia creciente más o menos constante en el transcurso del día y conforme se avanza a la tarde un aumento considerable, observándose, al compararse con la tendencia del flujo de savia un comportamiento típico, esta medición realizada durante un día despejado sin muchas variaciones de temperatura.

Estas graficas son obtenidas a partir de la ecuación (1) vistas en el método HFD de trabajos en trabajos anteriores utilizando los datos tomados para cada muestra en particular, en la siguiente ecuación tomada de trabajos anteriores del análisis de flujo de savia, es introducida en el código de la interfaz programa para procesar y graficar los datos en Python.

$$q1 = 3600D_{nom} \frac{(K+dT_s-a)}{dT_{ax}} \cdot \frac{z_{ax}}{z_{tg}} \quad (1)$$

Esta ecuación es la base de donde se hace la sustitución de los datos dentro de la programación de la interfaz ,donde se ajustan los datos dependiendo de las variables que se tengan como puede ser profundidad, la distancia entre los sensores y el diámetro del arbol analizado, esto se hace de ser necesario para que al calcular los datos dentro de la aplicación no presente datos erróneos en el caso de los datos para las pruebas no se modificaron puesto que se utilizaron los mismos parámetros, pero de cambiar el dispositivo es necesario cambiarlos.

$$\text{FLUX}=3600*\text{DST}*(\text{K}+(\text{SYM}-\text{ASYM}))*\text{ZAX}/(\text{ASYM}*\text{ZTG}*L) \quad (2)$$

Donde:

K=valor numérico (constante K).

L= profundidad de albura dado en cm.

Dst =difusividad térmica de la madera en $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$.

Zax =distancia axial dada en cm.

Ztg =distancia tangencial dada en cm.

3600= valor de conversión S.

SYM= datos de la temperatura inferior.

ASYM=datos de la temperatura superior.

Con los datos obtenidos con las mediciones de temperatura y sustituyendo los valores para cada medición se obtienen las gráficas de las figuras 30 y 31 como resultado de la sustitución de cada dato y los valores anteriormente vistos para la ecuación (2).

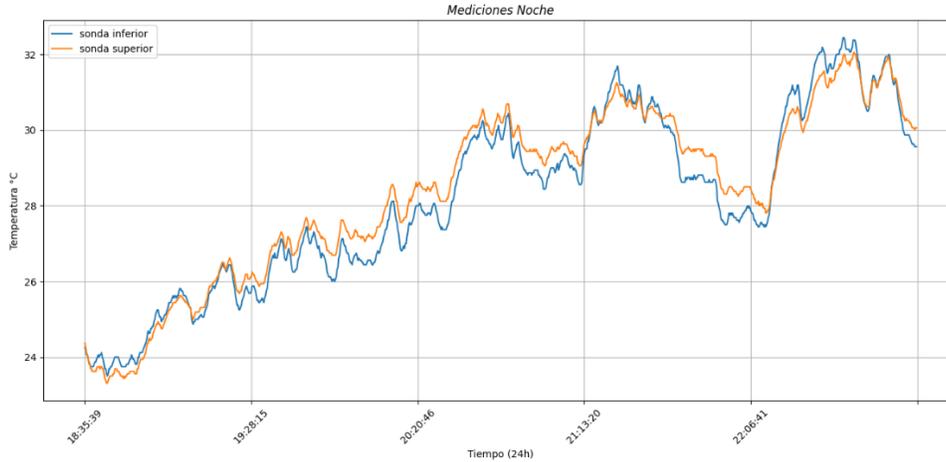


Figura 29. *Gráfica de medición de sensores durante la noche, en árbol tipo pino, elaboración propia, 2023.*

Para el caso de las mediciones tomadas a partir de la tarde se puede observar la tendencia de la gráfica durante la mayor parte de la noche un incremento notable en comparación de la gráfica de la mañana notándose en algunas partes unas pendientes muy pronunciadas entre las 21 y 22 horas donde se observa una disminución pronunciada a comparación de las mediciones más estables de la gráfica anterior.

4.1 Análisis de flujo de savia mediante interfaz gráfica.

Con la ayuda de la interfaz gráfica previamente vista es posible graficar los datos almacenados y presentarlos de manera gráfica para el usuario esta presenta la hora aproximada en la que se tomaron los datos en formato de 24 horas y por otro lado el valor de flujo de savia con sus correspondientes unidades además de la visualización también es posible guardar la imagen para llevar un registro visual de los datos almacenados.

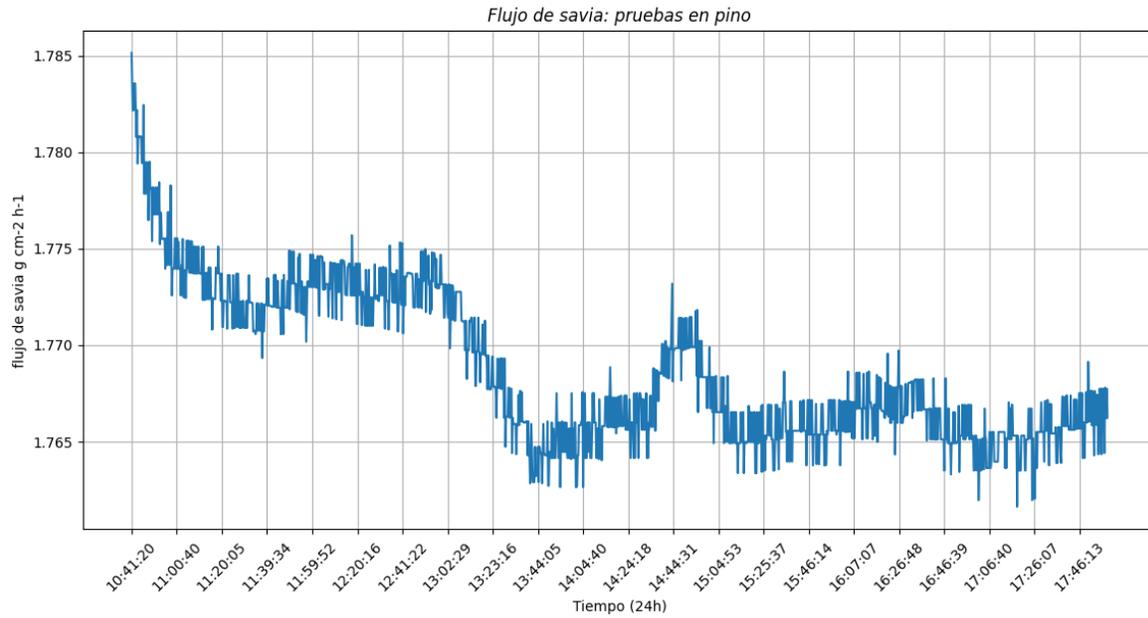


Figura 30. *Grafica de medición de sensores durante la tarde, en árbol tipo pino, procesada mediante interfaz gráfica, elaboración propia, 2023.*

Como se muestra en la gráfica de la figura anterior a partir de los datos proporcionados por la lectura de los sensores se puede hacer la estimación del flujo de savia que es presentada gráficamente esta grafica presenta una respuesta con bastante ruido debido a la cantidad de datos tomados a lo largo de la tarde se pretende presentar una gráfica más suavizada para tener una mejor visualización de los datos, en esta grafica se aprecia un inicio de alrededor de $1.78 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ teniendo un descenso a 1.65 manteniendo un valor entre 1.76 y 1.77 durante la mayor parte de la tarde.

En la figura 30, se puede ver que los mayores valores alcanzados se tienen constantes durante el medio día para el caso de las lecturas de esta tabla sin condiciones de mucha variación.

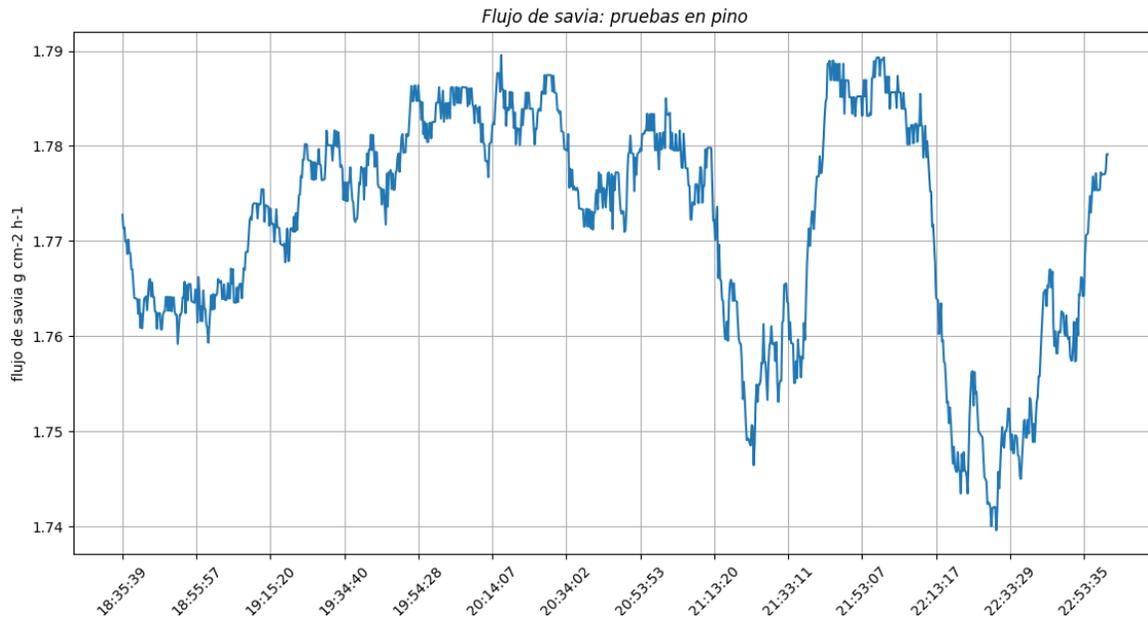


Figura 31. *Grafica de medición de sensores durante la tarde, en árbol tipo pino, elaboración propia, 2023.*

En el caso de las lecturas que se tienen durante la tarde se puede notar un valor mayor al promedio de las vistas en la gráfica de la figura 31 estas observadas durante la mayor parte de la noche teniendo variaciones más notables a partir de las 21 horas, pero manteniendo esas mediciones dentro de 1.77 y 1.79 muy acorde a las mayores registradas en la gráfica anterior.

System for Monitoring Sap Flow in Trees for Better Management of Available Irrigation Water.

Gamero-Inda E.¹, **García-Moreno L.I.²**, Godínez-García F.J.¹, Martínez-Rivera J.A.¹, Guerrero-Rivera R.¹, Ortíz-Medina J¹.

¹, Tecnológico Nacional de México TECNM/IT Durango,

Professors, MSc. in Engineering, Durango, México. egamero@itdurango.edu.mx

²TECNM/IT Durango, Student, MSc. in Engineering, Durango, México.

Abstract – The present work shows the design and assembly of a sap flow monitoring device to perform continuous readings in trees, based on the "Heat Field Deformation" (HFD) method, through the use of "easy to get" electronic systems and circuits. Additionally, we obtained a piece of software that enhances the device and makes it easy to switch to different types of trees (including fruit trees). The novelty of this proposal is to offer small and medium producers a technological, simple, and economical way to achieve a better and sustainable use of available irrigation water.

Key words: Agroindustry, Sap Flow Measuring, Precision Irrigation, Water Management.

1. INTRODUCTION

This project responds to a felt need for better and responsible water consumption when used for irrigation purposes, with great attention to irrigation of an orchard of fruit trees. This, is especially true in the Mexican state of Durango, where the cultivation of apple trees is a significant source of revenue for the small and medium producers in the municipality of Canatlán, Durango, México.

Knowing sap flow is a unique tool for achieving precision irrigation in apple trees. Understanding the water needs of apple trees is essential to achieve optimal and high-quality production. Measuring the water status of trees provides direct information on irrigation limitations, which, combined with monitoring sap flow, allows the relationship between climate and soil water to be adjusted to maintain an appropriate balance (Ferreira, et. al 2102). Precision irrigation offers several benefits, including greater efficiency in water use, reduction in production costs, and an enhancement in the quality of the final product (Siddiqi, et. al 2021). Therefore, monitoring sap flow can, significantly improve the consumption of irrigation water in apple trees orchards.

Sap flow measuring is a technique that allows you to, among other things, manage water use by trees. This technique, is commonly used to determine the water needs of crops. Sap flow sensors allow for accurate, real-time measurement of tree water consumption. Sensor technology has advanced significantly in recent years, allowing us to obtain greater accuracy in sap flow measurements (Davis, et. al 2012). The most widely used technique to measure sap flow is the heat

technique (Nadezhdina, 2018). Sap flow sensors are easy to install and can provide valuable information for precision irrigation monitoring in apple trees since using this information, the quantity of irrigation water can control fruit size or maximize it in cultivars with larger fruits or minimize it in cultivars with smaller fruits

Much better use of irrigation water in agriculture is a grave matter of discussion since climate change has affected some human activities, including agriculture (Chartzoulakis, et. al 2015). The combination of increased temperatures, changes in total annual rainfall, and population growth, is leading to longer periods of drought, and consequently, plants are exposed to greater stress. In the face of this challenge, digital technologies, such as the Internet of Things (IoT), can collect a good amount of data that can help producers facilitate decision-making and present themselves as an ally for the correct determination, quantity and, application of irrigation water.

1.2 Monitoring System.

The principal measurement variable is temperature, measured digitally using the 1-Wire Protocol since the devices with this protocol represent a great advantage for a portable system with more than one sensor. Since here it is important to reduce space and the number of connections for the circuits. The system uses point-to-point communication where one of the nodes is responsible for collecting the data that in turn, is transmitted through radio frequency communication modules. The receiving node has a Wi-Fi module with which it is possible to upload this data to the cloud for subsequent analysis and visualization.

1.3 Heat Field Deformation Method

In simple terms, the HFD method (Heat Field Deformation Method), as its name indicates, is based on the measurement of the heat field deformation around a needle-shaped linear heater inserted in a radial direction into the trunk stem of the tree. If we could see the heat field from the front (Figure 1), it would appear as a symmetrical ellipse, due to the different thermal conductivities of the trunk fibers in the axial and tangential directions under zero flow conditions. Applying heat utilizing the linear heater, we can obtain a deformation in the shape of the ellipsoid of the heat field under the influence of the sap flow. The stem must be

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

El proyecto concluido logro el objetivo principal: Diseñar un sistema de monitoreo de flujo de savia con tecnologías de última generación de bajo costo y fácil adquisición, con el fin de ofrecer una alternativa para hacer eficiente la utilización de los recursos hídricos. El resultado de esta investigación es útil para quienes pretenden desarrollar aplicaciones orientadas al desarrollo agrícola específicamente en el área de los árboles frutales, permitiente genera una base de datos que permitan ahorrar tiempo, dinero y esfuerzo. Uno de los factores importantes para la elaboración de este modelo es la utilización adecuada de componentes los cuales influyen de manera directa en la calidad de los resultados, estos componentes han sido los adecuados y suficientes para la culminación del proyecto.

Una de las características importantes es la generación de la aplicación capaz de generar una respuesta a partir de las mediciones y poder desplegar de manera gráfica los resultados.

También es importante destacar que el dispositivo cuenta con limitaciones si se considera aplicarlo de manera que se tengan registros continuos o se implementa para la toma de datos prolongados esto principalmente debido a las limitaciones de la alimentación puesto que este cuenta con baterías de alimentación dentro de el mismo gabinete se recomienda la utilización de paneles fotovoltaicos con baterías de mayor capacidad si se utiliza para periodos prolongados de pruebas. Finalmente se consideró principalmente el bajo costo para la elaboración del dispositivo y que este pueda ser utilizado sin la necesidad de ser un especialista en la utilización de dispositivos electrónicos para facilitar su implementación

Referencia

- Almacenamiento. (2018) Base de datos en la nube. Obtenido de: Base de datos en la nube - Internet.com.co.
- Álvaro López Bernal. (2015). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. Efectos del déficit hídrico sobre el flujo de savia y la conducta estomática en frutales.
- Aprender los aspectos básicos de ThingSpeak, obtenido de: <https://la.mathworks.com/help/thingspeak/getting-started-with-thingspeak.html>
- Árek, V.; Kováčová, M.; Kišš, V.; Paulen, O. (2021). Water Regime Monitoring of the Royal Walnut (*Juglans regia* L.) Using Sap Flow and Dendrometric Measurements.
- Assessment of a PC based system to measure sap flow in herbaceous plants in real time. [Evaluación de un sistema basado en PC para medir flujo de savia en tallos herbáceos en tiempo real]. Chile. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/d0a6/34c800cb75eb0d149e345e644f85a29057e2.pdf>.
- Burgess, S., & Downey, A. (2018). SFM1 Sap Flow Meter Manual [Manual medidor de flujo de savia].
- Burman R, L O Pochov (1994) Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier Science B.V. U.S.A. 278 p.
- Chen, D., Wang, Y., Liu, S., Wei, X., & Wang, X. (2012). Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China. Yangling 712100, China: Agricultural Water Management.
- Francis J. Pierce, Peter Nowak, (1999). Aspects of Precision Agriculture, *Advances in Agronomy* Volume 67, Pages 1-85.
- Granier, A., (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 42 (2), 193–200. House of Mendel University, Czech Republic, pp. 72–92.

- ICT INTERNATIONAL. (2011). Soluciones para el monitoreo del suelo, planta y medio ambiente. Obtenido de ICT INTE, Interpreting the Heat Field Deformation method: Erroneous use of thermal diffusivity and improved correlation between temperature ratio and sap flux density.
- INVEMAR, (2018). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Informe Técnico. Santa Marta: Informe Técnico Final 2017, Volumen 16.
- Jensen, M.E., Wright, J.L. (1978). The role of evapotranspiration models in irrigation.
- José Gutiérrez López (2016). Estimación de flujo de savia utilizando el método de disipación de calor: análisis de datos. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Junbin Zhao a, Holger Lange a, Helge Meissner a, Ryan M. Bright b (2022). Comparing sap flow calculations from Heat Field Deformation (HFD) and Linear Heat Balance (LHB) methods.
- Manual de agricultura de precisión / IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA, (2014).
- María Emilia Cambroner Piqueras. Modelado y Análisis Formal del Protocolo de Comunicación de Sensores One Wire.
- Matplotlib 3.8.2 documentation. obtenido de: <https://matplotlib.org/stable/index.html>
- Maurits W. Vandegehuchte*, Kathy Steppe (2012).
- Nadezhdina N (2018). Revisiting the Heat Field Deformation (HFD) method for measuring sap Flow.
- Nadezhdina, N. (1999). Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiol.* 19, 885-891.
- Nadezhdina, N., (2010). Integration of water transport pathways in a maple tree: responses of sap flow to branch severing. *Ann. For. Sci.* 67 (107), 110.
- Nadezhdina, N., Cermak, J., Gasperek, J., Nadezhdin, V., Prax, A., (2006). Vertical and horizontal water redistribution in Norway spruce (*Picea abies*) roots in the Moravian Upland. *Tree Physiol.* 26 (10), 1277–1288.

- Nadezhdina, N., Cermak, J., Nadezhdin, V., (1998). Heat field deformation method for sap flow measurements. In: Cermak, J., Nadezhdina, N. (Eds.), Proceedings of the 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants. Publishing.
- Nadezhdina, N., David, T.S., David, J.S., Ferreira, M.I., Dohnal, M., Tesar, M., Gartner, K., Leitgeb, E., Nadezhdin, V., Cermak, J., Jimenez, M.S., Morales, D., (2010). Trees never rest: the multiple facets of hydraulic redistribution. *Ecohydrology* 3, 431–444.
- Nadezhdina, N., Ferreira, M.I., Silva, R., Pacheco, C.A., (2008). Seasonal variation of water uptake of a *Quercus suber* tree in Central Portugal. *Plant Soil*. 305 (1–2), 105–119.
- Planeación agrícola nacional 2017-2030. Importancia de la manzana en México.
- R. A. Parra-Quezada; T. L. Robinson. Efecto de carga de fruto y déficit hídrico en la calidad y producción de manzana.
- Reyes, J. F., Jara, J., & Jeldres, R. (2007). design parameters evaluation of a sap flow meter for small trees [evaluación de parámetros de diseño en un medidor de flujo de savia para árboles pequeños].
- Rodolfo Bongiovanni, Evandro C. Montovani, Stanley Best, Alvaro Roel. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.
- Rodrigo Cruzat G. y Constanza Bellolio J. (2010). - AQUAVITA Consultores /Agricultura de precisión en frutales.
- Robotics: Erle-copter. (s.f.). Baterías de Litio y Polímero. Obtenido de <https://erlerobotics.gitbooks.io/erleroboticserlecopter/content/es/components/battry.html> Scheduleduling. *Trans. ASAE* 21 (1), 82–87.
- Trcala & Cermak (2016), A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood, Department of Wood Science, Mendel University in Brno, Brno, Czech Republic.
- Urbano-Molano, F. (2013). Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Cage en Colombia. *Ciencia e Ingeniería*, 46-52.

User manual STM32 Nucleo-64 boards (MB1136). Obtenido de:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf.

Valero Urbina Vallejo (2001). MORFOLOGÍA Y DESARROLLO VEGETATIVO DE LOS FRUTALES, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria Universidad de Lleida.

Walendziuk, Idzkowski, Machacek & Slanina, (2015). Evaluation of Pt100 Sensor Deflection Effect during Strain Measurements, Department of Electrical Engineering, Bialystok University of Technology.

Anexos

Anexo 1

Manual de usuario STM núcleo 32, se ingresa al enlace:

https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf

Anexo 2 Programa desarrollado en Python:

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np
#from scipy import signal

from tkinter import Tk, Label, Button, Frame, filedialog
import collections

ventana = Tk()
ventana.config(bg='black')
ventana.geometry('600x400')
ventana.minsize(width=600, height=400)
ventana.title('Graficar datos de CSV')

ventana.columnconfigure(0, weight = 25)
ventana.rowconfigure(0, weight= 25)
ventana.columnconfigure(0, weight = 1)
ventana.rowconfigure(1, weight= 1)

frame2 = Frame(ventana, bg='grey26')
frame2.grid(column=0, row=1, sticky='nsew')
frame2.columnconfigure(0, weight = 1)
frame2.rowconfigure(0, weight= 1)
frame2.columnconfigure(1, weight = 1)
frame2.rowconfigure(0, weight= 1)

frame2.columnconfigure(2, weight = 1)
frame2.rowconfigure(0, weight= 1)

frame2.columnconfigure(3, weight = 2)
frame2.rowconfigure(0, weight= 1)

def graficar_datos():
```

```

    archivo = filedialog.askopenfilename(initialdir
='C:/Users/Leong/Documents',title='Seleccione un archivo', filetype= (('csv
files','*.csv'), ('All files', '*..*')))
    df = pd.read_csv(archivo)
    valores = df[['Hora','sonda inferior', 'sonda superior']]
    colHora=df.pop('Hora')
    indica['text'] = archivo

    """ax=valores.plot.line(x='Hora', y=['sonda inferior','sonda
superior'], rot=0)
    #print(colHora)
    plt.tick_params(axis="x", labelrotation=45.0)
    plt.ylabel('Temperatura °C')
    plt.xlabel('Tiempo (24h)')
    plt.title('Mediciones Dia',style = "italic")
    plt.grid()
    plt.show()"""

#-----calculo de flujo de savia-----#
K=.6          # valor numerico (constante K) visto en Nadezhdina et
al. 2012
L=7.5         # profundidad de albura, cm
Dst = 0.0025  # difusividad termica de la madera, cm2 s-1
Zax = 1.5     # distancia axial , cm
Ztg = 0.5     # distance tangential , cm
# Sym        #diferencia de la temperatura simetrica
# Asym       #diferencia de la temperatura asimetrica

tup=df.pop('sonda superior')
tlow=df.pop('sonda inferior')
sym=tup-tlow
asym=tup-60
total=sym-asym
flux=3600*Dst*(K+(total))*Zax/(asym*Ztg*L) # funcion para flujo
positivo,g cm-2 h-1
fluxinv=-3600*Dst*(-K+total)*Zax/((asym-total)*Ztg*L)#flujo negativo
#print(flux,fluxinv)

#----tabla de flujo flujo de savia -----
plt.tick_params(axis="x", labelrotation=45.0)
plt.xlabel('Tiempo (24h)')
plt.ylabel('flujo de savia g cm-2 h-1',style = "italic")
plt.title('Flujo de savia: pruebas en pino',style = "italic")
plt.plot(colHora, fluxinv)
contador= len(colHora)

```

```

plt.xticks(range(0,contador,75))

#suavizado de grafica-----
#ysuav=signal.savgol_filter(flux,49,3)
#plt.plot(colHora,ysuav,color='green')

plt.grid()
plt.show()

def close_window():
    ventana.destroy()

indica = Label(frame2, fg= 'white', bg='gray26', text= 'Ubicación del
archivo', font= ('Arial',11,'bold') )
indica.grid(column=1, row = 0)

boton2 = Button(frame2, text= 'Graficar',font= ('Arial',12,'bold'),
bg='lightblue', command= graficar_datos)
boton2.grid(column = 2, row = 0, sticky='nsew', padx=10, pady=10)

boton3 = Button(frame2, text= 'Cerrar', font= ('Arial',12,'bold'), bg='red',
command= close_window)
boton3.grid(column = 3, row = 0, sticky='nsew', padx=10, pady=10)

ventana.mainloop()

```

Anexo 3

Librerías utilizadas:

OneWire, ingresar al enlace:

<https://github.com/PaulStoffregen/OneWire>

DallasTemperature ingresar al enlace:

<https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library>.

NRF24L01, ingresar al enlace:

<https://github.com/nRF24/RF24>