

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Prototipo electrónico de análisis de microclima y control de riego para mitigar el déficit de presión de vapor (DPV) en cultivos.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización.

Presentado por:

De La Cruz De La Cruz Wilson Adrian
Valencia Coello Adrian Geovanny

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Amabilia del Pezo y Wilson De la Cruz, por la guía, la educación y el esfuerzo brindado desde el inicio y durante el transcurso de mi formación académica, valores que fueron fundamentales para alcanzar esta meta y que hoy permanecen como su legado.

Asimismo, dedico este logro a mi esposa, Arq. Diana Alejandro, por ser un pilar fundamental en la culminación de mi carrera, por su apoyo incondicional, motivación diaria y fortaleza en cada etapa de este proceso.

Finalmente, dedico este trabajo a mis suegros, por el apoyo económico brindado y por ofrecerme un lugar donde permanecer en esta ciudad, lo cual permitió continuar y culminar mis estudios profesionales.

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios por darme fuerzas y no desistir en el camino hacia mi objetivo.

A mis padres Nancy, German y mi esposa Wendy que siempre me apoyaron incondicionalmente, a mi hija luna quien ha sido mi mayor motivación para no rendirme en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento al Ph. D. Efrén Herrera, docente de la materia integradora, por sus constantes observaciones, seguimiento y aportes realizados durante las sesiones de los viernes, los cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento del proyecto.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento al Ph. D. César Antonio Martín Moreno, tutor del proyecto, por su orientación, apoyo y valiosas observaciones durante el desarrollo de este trabajo.

De igual manera, agradecemos al Msc. Paúl Daza por sus aportes técnicos y acompañamiento en el proceso de diseño e implementación del sistema de monitoreo y control.

Finalmente, extendemos un especial agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral por la formación académica brindada y por las facilidades otorgadas para la realización del presente proyecto.

Declaración Expresa

Nosotros Wilson Adrián De La Cruz De La Cruz y Adrián Geovanny Valencia Coello acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de octubre del 2025.



Wilson De La Cruz



Adrián Valencia

EVALUADORES

Ph. D. EFRÉN HERRERA MUENTES

PROFESOR DE LA MATERIA

Ph. D. CÉSAR MARTÍN MORENO

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto integrador tiene como objetivo diseñar e implementar un prototipo electrónico capaz de analizar variables de microclima agrícola y controlar el riego con el fin de mitigar el estrés hídrico asociado al Déficit de Presión de Vapor (DPV) en cultivos. Se plantea como hipótesis que el control automatizado del riego, basado en el análisis del microclima y en la regulación de la humedad del suelo y la lámina de agua, permite mantener condiciones fisiológicas óptimas para la planta y optimizar el uso del recurso hídrico. La justificación del proyecto se fundamenta en la necesidad de tecnificar el riego agrícola mediante soluciones accesibles y basadas en datos reales de campo.

El desarrollo del proyecto se realizó mediante un enfoque experimental, utilizando un microcontrolador ESP32, sensores de temperatura y humedad relativa (DHT11), sensores de humedad del suelo y un sensor ultrasónico para la medición de la lámina de agua. Se implementó un sistema de control PI para regular el caudal de riego a través de una bomba de agua accionada por señal PWM, considerando el DPV como una perturbación del sistema.

Los resultados obtenidos demostraron que el prototipo permitió caracterizar adecuadamente la dinámica del microclima y regular de forma estable la humedad del suelo y la lámina de agua. Se evidenció una reducción del error en estado estacionario y una respuesta coherente del sistema ante variaciones ambientales.

Finalmente, se concluye que el prototipo desarrollado es funcional, técnicamente viable y replicable, constituyendo una alternativa eficiente para la automatización del riego orientada a la mitigación del DPV en cultivos agrícolas

Palabras clave: Microclima agrícola, Déficit de Presión de Vapor, Control PI, Riego automatizado, ESP32

ABSTRACT

This integrative project aims to design and implement an electronic prototype capable of analyzing agricultural microclimate variables and controlling irrigation in order to mitigate water stress associated with Vapor Pressure Deficit (VPD) in crops. It is hypothesized that automated irrigation control, based on microclimate analysis and the regulation of soil moisture and water layer level, allows optimal physiological conditions for plant development while improving water use efficiency. The project is justified by the need to promote accessible and data-driven technological solutions for agricultural irrigation.

The project development followed an experimental approach using an ESP32 microcontroller, temperature and relative humidity sensors (DHT11), soil moisture sensors, and an ultrasonic sensor for water layer measurement. A PI control system was implemented to regulate irrigation flow through a water pump driven by a PWM signal, considering VPD as a system disturbance.

The obtained results showed that the prototype effectively characterized microclimate dynamics and achieved stable regulation of soil moisture and water layer level. A reduction in steady-state error and a consistent system response under environmental variations were observed.

It is concluded that the developed prototype is functional, technically feasible, and replicable, representing an efficient solution for irrigation automation focused on VPD mitigation in agricultural crops.

Keywords: Agricultural microclimate, Vapor Pressure Deficit, PI control, Automated irrigation, ESP32

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	6
RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	12
1. Introducción.....	12
1.1 Descripción del problema	12
1.2 Justificación del problema	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Marco Teórico.....	13
1.4.1 Microclima agrícola.....	13
1.4.2 Déficit de presión de vapor (DPV).....	16
1.4.3 Sensores y actuadores empleados.....	20
1.4.3.1 Microcontrolador ESP32-WROOM-32.....	20
1.4.3.2 Sensor DHT11 (Temperatura y Humedad Relativa)	22
1.4.3.3 Sensor FC-28 Humedad del suelo	24
1.4.3.4 Sensor ultrasónico HC-SR04 para medición de lámina de agua...27	

1.4.3.5	Driver L298N – Controlador de potencia	29
1.4.3.6	Bomba de diafragma R385 – Actuador de riego	30
1.4.4	Algoritmo de control PID	31
CAPÍTULO 2	35
2.	Metodología	35
2.1	Enfoque metodológico	35
2.2	Alternativas de solución.....	36
2.3	Caracterización experimental del microclima (DPV).....	38
2.4	Evaluación experimental de la medición de la humedad del suelo	41
2.5	Selección de la variable de control: lámina de agua	44
2.6	Identificación experimental del sistema de riego.	47
2.7	Metodología de diseño y desarrollo	50
2.8	Diseño electrónico	51
2.9	Metodología de diseño del controlador PI.....	54
2.10	Especificaciones técnicas.....	55
CAPÍTULO 3	58
3.	Resultados Y ANÁLISIS	58
3.1	Resultados de la adquisición de datos del microclima.....	58
3.2	Resultados del cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV).....	60
3.3	Resultado de la medición de la humedad del suelo.....	63
3.4	Identificación del modelo matemático del sistema lámina de agua-riego.....	66
3.4.1	Identificación experimental de la bomba peristáltica	66
3.4.2	Estimación de parámetros dinámicos $K1$, $\tau1$ y L	67
3.4.3	Caracterización geométrica del recipiente	69
3.4.4	Identificación del suelo como resistencia hidráulica.....	69
3.4.5	Modelo matemático global de la planta.	70

3.5	Diseño y simulación del controlador PI.	70
3.5.1	Objetivo del diseño del controlador	70
3.5.2	Modelo dinámico de la planta para el diseño del control.	71
3.5.3	Análisis del sistema mediante el lugar geométrico de las raíces	71
3.5.4	Selección de polos dominantes y criterios de desempeño	72
3.5.5	Ajuste del controlador PI mediante SISO Tool	73
3.5.6	Análisis de la respuesta temporal del sistema controlado.	73
3.5.7	Discusión de resultados.....	74
3.6	Validación experimental	75
3.7	Resultados del sistema de control de riego	78
3.8	Análisis integral del sistema	80
3.9	Análisis de costos	82
CAPÍTULO 4		84
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	84
	Conclusiones	84
	Recomendaciones	85
BIBLIOGRAFÍA		87
APÉNDICES		89

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ESP32	Microcontrolador ESP32-WROOM-32
DPV	Déficit de Presión de Vapor
HR	Humedad Relativa
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation)
PI	Control Proporcional–Integral
PID	Control Proporcional–Integral–Derivativo
ADC	Convertidor Analógico–Digital
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
VPD	Vapor Pressure Deficit
DC	Corriente Continua (Direct Current)
AC	Corriente Alterna (Alternating Current)
SP	Setpoint (valor de referencia)
PV	Process Variable (variable de proceso)
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level

SIMBOLOGÍA

°C	Grado Celsius
%	Porcentaje
kPa	Kilopascal
DPV	Déficit de Presión de Vapor
T	Temperatura del aire
HR	Humedad relativa
e_s	Presión de vapor de saturación
e	Presión de vapor real
$u(t)$	Señal de control
$e(t)$	Error de control
SP	Valor de referencia (Setpoint)
PV	Variable de proceso
K_p	Ganancia proporcional
K_i	Ganancia integral
K_d	Ganancia derivativa
PWM	Modulación por ancho de pulso
ADC	Convertidor analógico–digital
m	Metro
cm	Centímetro
s	Segundo
t	Tiempo
Q	Caudal de riego
h	Altura o lámina de agua
V	Voltaje
A	Corriente eléctrica

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Comportamiento típico del microclima en un invernadero controlado, mostrando variación de temperatura y radiación. [1]	14
Figura 1.2 Microclima modificado bajo un sistema agrivoltaico, con reducción de radiación y temperatura. [2]	15
Figura 1.3 Relación entre temperatura, humedad relativa y el Déficit de Presión de Vapor (DPV). [4].....	17
Figura 1.4 Módulo de la ESP32-WROOM-32 DevikitC	21
Figura 1.5 Sensor DHT11 para lectura de temperatura y humedad relativa.	23
Figura 1.6 Sensor humedad del suelo FC-28 Higrómetro.....	26
Figura 1.7 Sensor ultrasónico HC-SR04 utilizado para la medición de la lámina de agua en el sistema de riego.....	29
Figura 1.8 Módulo Driver L298N.....	30
Figura 2.1 Arquitectura general del prototipo electrónico para el análisis del microclima y el control automatizado del riego.	39
Figura 2.2 Arquitectura general del prototipo electrónico para el análisis del microclima y el control automatizado del riego.	39
Figura 2.3 Montaje experimental para medición de humedad del suelo en maceta...	42
Figura 2.4 <i>Distribución de sensores de humedad del suelo a diferentes profundidades</i>	43
Figura 2.5 <i>Sistema de riego radial mediante venoclis</i>	44
Figura 2.6 Ensayos con los sensores resistivos y capacitivos V1.2	45
Figura 2.7 <i>Diseño del tubo de calma con filtrado lateral para medición de nivel</i>	46
Figura 2.8 Montaje experimental para la identificación dinámica de la bomba	48
Figura 2.9 Geometría y dimensiones del recipiente de almacenamiento	48
Figura 2.10 Ensayo experimental para la caracterización hidráulica del suelo	49
Figura 2.11 Diagrama de flujo del algoritmo.....	51
Figura 3.1 Variación de la temperatura del aire registrada durante el periodo experimental.....	58
Figura 3.2 Variación de la humedad relativa del aire registrada durante el periodo experimental.....	59

Figura 3.3 Comparación de lecturas de temperatura y humedad relativa obtenidas por los dos sensores DHT11.....	59
Figura 3.4 Relación entre las condiciones experimentales del cultivo, la evolución del Déficit de Presión de Vapor (DPV) y la radiación solar durante el periodo de medición.	61
Figura 3.5 Variación diaria del Déficit de Presión de Vapor (DPV) en condiciones climáticas naturales.	61
Figura 3.6 Evolución temporal de la humedad del suelo medida con sensores FC-28 en dos macetas con diferente volumen de riego.....	63
Figura 3.7 Respuesta de la humedad del suelo utilizando sensores capacitivos v1.2 en maceta con tierra de sembrío.	64
Figura 3.8 Distribución de la humedad del suelo en balde de mayor profundidad con sensores ubicados a distintas alturas.....	64
Figura 3.9 Dinámica de la humedad del suelo en tierra arcillosa compactada bajo riego puntual.	65
Figura 3.10 Evolución de la humedad del suelo bajo riego radial por goteo controlado mediante sistema de venoclisis.	66
Figura 3.11 Modelo dinámico del sistema de riego implementado en Simulink	71
Figura 3.12 Lugar geométrico de las raíces del sistema de riego	72
Figura 3.13 Editor del lugar geométrico de las raíces en SISO Tool	73
Figura 3.14 Respuesta al escalón del sistema de riego con controlador PI	74
Figura 3.15 Respuesta experimental del controlador PI utilizando sensores FC-28 ..	75
Figura 3.16 Dinámica de la lámina de agua medida mediante sensor ultrasónico.....	76
Figura 3.17 Cambios de parámetros del controlador	77
Figura 3.18 Dinámica del control del riego con el sensor CapacitiveV1.2.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rangos de DPV y respuesta fisiológica en lechuga y albahaca	19
Tabla 2.1 Ensayos realizados para la caracterización experimental del microclima ..	40
Tabla 2.2 Asignación de pines del ESP32 utilizados en el diseño electrónico.	53
Tabla 3.1 Valores representativos del Déficit de Presión de Vapor calculado.	62
Tabla 3.2 Medición de caudal de la bomba para distintos niveles de PWM	67
Tabla 3.3 Tiempo de retardo para llegar desde reservorio de agua al recipiente.	68
Tabla 3.4 Caudal al 80%.....	68
Tabla 3.5 Tiempo de estabilización del caudal al 80%	68
Tabla 3.6 Estimación de parámetros dinámicos de la bomba.....	68
Tabla 3.7 Dimensiones geométricas del recipiente.....	69
Tabla 3.8 Condiciones iniciales del suelo para los ensayos hidráulicos.....	69
Tabla 3.9 Ensayos de drenaje y formación de lámina de agua en el suelo.....	70
Tabla 3.11 Costos de los componentes del prototipo de control de riego	82

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 2.1 Arquitectura general del prototipo electrónico para el análisis del microclima y el control automatizado del riego.	¡Error! Marcador no definido.
Plano 2.2 Diagrama del sistema electrónico del prototipo.	52

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En la agricultura local, el riego se concentra principalmente en las horas de sol debido a la disponibilidad de mano de obra, el uso manual de los equipos y la jornada laboral, lo que impide regar en momentos más adecuados para la fisiología de la planta. En ausencia de tecnificación, las decisiones de riego no consideran variables microclimáticas ligadas al Déficit de Presión de Vapor (DPV), cuya dinámica diurna es marcada en el cultivo.

Como resultado, provoca que el riego no tome en cuenta variables de campo ligadas al déficit de presión de vapor (DPV), generando escenarios en los que, por falta de riego, el DPV se eleva y la planta entra en estrés hídrico, o en los que, al compensar en exceso y saturar el microclima con vapor, se produce el cierre de las estomas, limitando la transpiración y afectando directamente el desarrollo del cultivo.

La falta de un sistema electrónico que permita analizar el microclima y regular el riego en función del DPV mantiene una brecha tecnológica: no hay medición ni criterio objetivo para accionar la bomba en el momento y caudal adecuados. Esto limita la transición hacia una agricultura eficiente y sostenible, basada en datos y mejor estabilidad fisiológica del cultivo.

1.2 Justificación del problema

La solución planteada es apropiada porque el análisis del riego basado en el déficit de presión de vapor (DPV) permite programar y ejecutar el riego incluso durante las horas de sol sin provocar enfermedades en la planta. Esto es posible al garantizar que la aplicación de agua se realice en cantidades precisas y controladas, manteniendo un microclima estable y saludable, similar al que se logra en los invernaderos tecnificados.

El monitoreo en tiempo real de las variables del dosel de la planta ofrece información precisa sobre sus necesidades hídricas reales del cultivo, lo que permite verter el riego al suelo de manera adecuada y en el momento correcto, evitando tanto el estrés por déficit de agua como la saturación de vapor que genera cierre estomático y reducción fotosintética.

Desde el punto de vista ingenieril, el proyecto integra sensores electrónicos, un microcontrolador ESP32 y algoritmos de control automatizado, constituyendo una solución tecnológica funcional y replicable. Esta propuesta reduce la dependencia de la mano de obra y de la jornada laboral, asegurando decisiones basadas en datos medidos y no en criterios empíricos.

Además, el prototipo contribuye a la optimización del uso del recurso hídrico, mejora la salud del cultivo y contribuye a la sostenibilidad agrícola, generando un impacto positivo en comunidades rurales al promover la tecnificación accesible. Finalmente, el sistema permitirá registrar datos experimentales sobre el comportamiento del DPV, aportando valor académico y aplicabilidad práctica a futuros proyectos de automatización agrícola.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un método que permita el análisis de las variables que afectan el DPV mediante un control de riego.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar el tipo de suelo que permita la observación dinámica de acumulación de agua.
- Investigar las variables que interfieren en los cambios del DPV y humedad del suelo para mejoras en el riego.
- Especificar caudales que permitan observaciones en la dinámica del DPV

1.4 Marco Teórico.

1.4.1 Microclima agrícola.

El microclima agrícola se refiere al conjunto de condiciones ambientales que se generan en el entorno inmediato del cultivo, especialmente en espacios confinados o parcialmente controlados, como invernaderos, túneles o áreas bajo sistemas de sombreado. Estas variables —como la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, viento y humedad del suelo— determinan directamente el crecimiento, desarrollo y

productividad de los cultivos. Por esta razón, comprender y gestionar el microclima se ha convertido en un componente fundamental para mejorar la eficiencia del agua, optimizar el rendimiento y reducir el impacto del estrés térmico en la agricultura moderna.

En primer lugar, es importante señalar que los cambios en la temperatura y humedad del entorno generan variaciones en procesos fisiológicos como la evapotranspiración (ET), la apertura estomática y el balance hídrico. Según Kokieva et al. [1], los microclimas dentro de invernaderos suelen presentar temperaturas del aire superiores a las del ambiente exterior debido al efecto de confinamiento y a la mayor retención de calor. A esto se suma un incremento característico en la humedad relativa, lo cual puede favorecer la disponibilidad de agua en el cultivo, pero también incrementar riesgos como mohos o enfermedades cuando no existe ventilación adecuada. En este contexto, el manejo automatizado del microclima cobra relevancia, ya que permite mantener parámetros dentro de rangos técnicamente óptimos para cada especie.

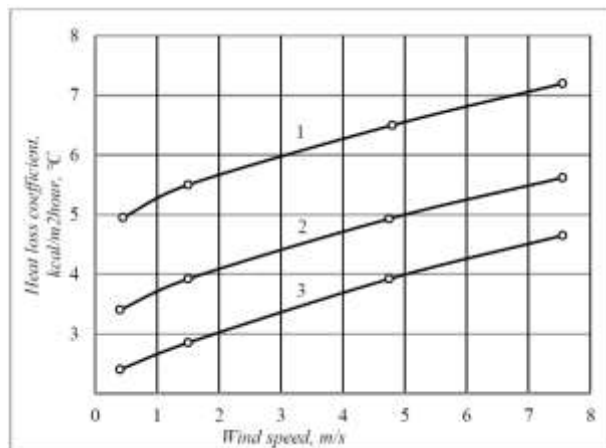


Figura 1.1 Comportamiento típico del microclima en un invernadero controlado, mostrando variación de temperatura y radiación. [1]

De manera complementaria, las investigaciones recientes sobre sistemas agrivoltaicos (AV) demuestran que la modificación del microclima no solo depende de estructuras cerradas, sino también de intervenciones estratégicas como el sombreado parcial mediante paneles fotovoltaicos elevados. Omer et al. [2] reportan que estos sistemas reducen la temperatura del aire entre 1 y 4 °C y aumentan la humedad relativa bajo las áreas sombreadas, lo cual disminuye la evapotranspiración y mejora la eficiencia en el uso del agua entre un 20% y 47%. Este tipo de regulación pasiva del microclima contribuye a crear ambientes más estables, especialmente en zonas con alta radiación o estrés térmico, como ocurre comúnmente en regiones secas o semiáridas.



Figura 1.2 Microclima modificado bajo un sistema agrivoltaico, con reducción de radiación y temperatura. [2]

En conjunto, el microclima agrícola constituye una variable crítica en la planificación y operación de cualquier sistema de producción. Su adecuada comprensión facilita el desarrollo de soluciones tecnológicas —como sensores, automatización del riego o sistemas de sombreado inteligente— que permiten mantener condiciones óptimas de crecimiento y garantizar la sostenibilidad del cultivo.

1.4.2 Déficit de presión de vapor (DPV).

El Déficit de Presión de Vapor (DPV) es una variable clave del microclima que describe la diferencia entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que podría contener si estuviera saturado. Este parámetro integra simultáneamente la temperatura del aire y la humedad relativa, convirtiéndose en un indicador directo de la demanda evaporativa del ambiente. Cuando el DPV aumenta, el aire se vuelve más seco y, por lo tanto, la planta pierde más agua por transpiración; cuando disminuye, la atmósfera ofrece menor resistencia al intercambio gaseoso y se favorece la apertura estomática.

Para cuantificar el Déficit de Presión de Vapor, se emplea una ecuación ampliamente utilizada en fisiología vegetal, donde el DPV depende directamente de la presión de vapor de saturación del aire —determinada por la temperatura— y de la humedad relativa del ambiente. Esta relación se expresa mediante la fórmula:

$$DPV = e_s(T) * \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad (1.1)$$

Donde:

- e_s = presión de vapor de saturación (kPa), dependiente de la temperatura
- HR = humedad relativa (%)

Y la presión de saturación $e_s(T)$ se calcula con la ecuación de Tetens:

$$e_s(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27*T}{T+237.3}\right) \quad (1.2)$$

Entonces, la fórmula completa del DPV queda:

$$DPV = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27*T}{T+237.3}\right) * \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \quad (1.3)$$

Donde T es la temperatura del aire en $^{\circ}\text{C}$ y 0.6108kPa corresponde a la presión de saturación a 0°C . Esta ecuación permite estimar con precisión cuánta “fuerza evaporativa” ejerce la atmósfera sobre las hojas, lo que facilita implementar estrategias de control climático y automatización del riego basadas en el DPV.

Desde un enfoque fisiológico, el DPV determina la velocidad a la que el agua se mueve desde la hoja hacia la atmósfera. Como señalan Grossiord et al. [4], cuando el DPV es elevado, la planta enfrenta una tensión hídrica significativa debido a que la atmósfera demanda más agua de la que las raíces pueden reponer. Este desequilibrio induce el cierre parcial o total de los estomas, reduciendo la transpiración, pero también limitando la fotosíntesis. En cultivos sensibles, esta dinámica disminuye la eficiencia en el uso del agua y afecta el crecimiento y la productividad, especialmente en escenarios de incremento de temperatura asociado al cambio climático.

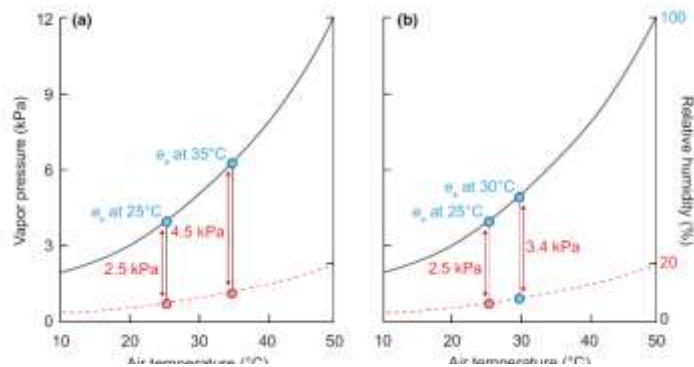


Figura 1.3 Relación entre temperatura, humedad relativa y el Déficit de Presión de Vapor (DPV). [4]

El DPV no solo afecta procesos fisiológicos externos, sino que también modula la estructura interna de la hoja. El estudio de Amitrano et al. [5] revela que las plantas sometidas a un DPV elevado desarrollan modificaciones anatómicas compensatorias: aumentan la densidad estomática, disminuyen el tamaño de los estomas y fortalecen la red vascular mediante un incremento de venas menores. Estos ajustes buscan mejorar el control del flujo de agua y facilitar la recarga hídrica, aun en

condiciones adversas. Sin embargo, los autores también indican que este esfuerzo estructural no siempre se traduce en mayor eficiencia fisiológica, ya que la conductancia interna del mesófilo disminuye cuando el ambiente es demasiado seco.

Es importante destacar que el DPV interactúa estrechamente con otras variables del microclima, como la radiación solar. Un aumento de la temperatura debido a radiación intensa incrementa inevitablemente el DPV, elevando la demanda evaporativa. Por ello, estructuras como los invernaderos, los sombreros o los sistemas agrivoltaicos modifican indirectamente el DPV al regular la temperatura y la humedad relativa dentro del área productiva. Omer et al. [6] señalan que debajo de paneles fotovoltaicos elevados se reduce la temperatura entre 1 y 4 °C y se incrementa la humedad relativa, lo que conlleva a una disminución del DPV y, por consecuencia, a menores tasas de evapotranspiración. Este efecto pasivo representa una alternativa valiosa para cultivos ubicados en regiones con alta radiación o ambientes áridos, donde el DPV suele alcanzar valores críticos.

De manera complementaria, al analizar cultivos de hoja como la lechuga y especies aromáticas como la albahaca, es posible definir rangos operativos de DPV que sirven como referencia para el manejo del microclima. En el caso de la lechuga 'Salanova', Amitrano et al. [5] muestran que un DPV moderado cercano a 0,78 kPa favorece una mayor biomasa, mejor estado hídrico y mayor eficiencia en el uso del agua, mientras que un DPV de 1,4 kPa se considera subóptimo y genera respuestas anatómicas de compensación, asociadas a estrés fisiológico. Por otro lado, estudios sobre *Ocimum basilicum* en ambientes protegidos indican que la albahaca presenta un rango óptimo de DPV ligeramente similar, pero con límites fisiológicos bien marcados: valores muy bajos (aire excesivamente húmedo) incrementan el riesgo de enfermedades y valores muy altos (aire

muy seco) disparan el estrés hídrico y reducen la biomasa aérea [7], [8]. Esta síntesis se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Rangos de DPV y respuesta fisiológica en lechuga y albahaca

Cultivo	Contexto de cultivo	Rango de DPV (kPa)	Respuesta fisiológica dominante
Lechuga 'Salanova'	Sistema vertical, ambiente controlado	≈ 0,78 (VPD "bajo/moderado")	Mayor biomasa, mayor fotosíntesis y mejor eficiencia en el uso del agua; anatomía foliar eficiente
Lechuga 'Salanova'	Sistema vertical, ambiente controlado	≈ 1,4 (VPD "alto/subóptimo")	Reducción de crecimiento e iWUE; aumento de densidad estomática y venosa como respuesta de plasticidad anatómica
Albahaca (Ocimum basilicum)	Invernadero/hidroponía, HR 70–85 %	≈ 0,65–1,0	Zona de confort fisiológica: transpiración estable, máxima fotosíntesis, hojas sanas y buena acumulación de biomasa
Albahaca (Ocimum basilicum)	Ambiente muy húmedo, HR > 85–95 %	< 0,4–0,5	DPV muy bajo; baja transpiración, riesgo elevado de enfermedades fúngicas (p. ej. mildiu), pérdida de calidad foliar
Albahaca (Ocimum basilicum)	Ambiente seco/cálido, estrés hídrico	> 1,2	Cierre estomático, reducción del área foliar y de la biomasa; posible aumento de concentración de aceites esenciales

Como se observa, tanto lechuga como albahaca comparten un comportamiento similar: existen rangos intermedios de DPV donde la planta puede mantener estomas abiertos, sostener una fotosíntesis elevada y acumular biomasa de forma eficiente. En cambio, cuando el DPV se aleja de este intervalo —ya sea por sequedad extrema o por saturación de humedad— predominan respuestas de estrés que reducen crecimiento y

productividad. En el caso específico de la albahaca, Simon et al. [9] demostraron que un estrés hídrico moderado, análogo a mantener el cultivo bajo DPV ligeramente elevado, puede incrementar la concentración de aceites esenciales, aunque a costa de una disminución del peso seco foliar. Esto refuerza la idea de que el control del DPV no solo impacta el rendimiento en biomasa, sino también la calidad aromática del cultivo, especialmente en especies de interés culinario e industrial.

En síntesis, el Déficit de Presión de Vapor constituye una variable fundamental para entender cómo la planta interactúa con su entorno inmediato. Su regulación adecuada no solo evita pérdidas por marchitez o estrés térmico, sino que también mejora la eficiencia en el uso del agua y aumenta la resiliencia del cultivo frente a variaciones climáticas. De esta manera, el análisis del DPV se convierte en un componente indispensable en el diseño de invernaderos, sistemas agrivoltaicos y prototipos de riego automatizado enfocados en la sostenibilidad agrícola.

1.4.3 Sensores y actuadores empleados.

1.4.3.1 Microcontrolador ESP32-WROOM-32.

El ESP32-WROOM-32 es el controlador principal del sistema de monitoreo de microclima y riego automatizado. Su arquitectura integra un microprocesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi/Bluetooth, memoria interna y una amplia gama de periféricos, lo que lo convierte en un módulo ideal para aplicaciones de agricultura inteligente e IoT.

Este microcontrolador es capaz de realizar de manera simultánea la lectura de sensores ambientales, el cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV) y el accionamiento de actuadores hidráulicos. Según su hoja técnica, el chip incorpora dos procesadores Xtensa LX6 operando entre 80 y 240 MHz, además de 520 KB de SRAM y 4 MB de memoria flash, elementos suficientes para ejecutar tareas

paralelas como adquisición de datos, transmisión por Wi-Fi y control de riego basado en umbrales [10].



**Figura 1.4 Módulo de la ESP32-WROOM-32
DevKitC**

Entre sus periféricos más relevantes están:

- ADC de hasta 18 canales, utilizados para leer sensores de humedad del suelo.
- Más de 30 pines GPIO, útiles para controlar relés, bombas y electroválvulas.
- Conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n, que permite enviar datos a plataformas de monitoreo y operar el sistema remotamente.
- Protocolos UART, SPI e I²C, necesarios para vincular sensores como DHT11/DHT22 y pantallas de visualización.

Gracias a estas prestaciones, el ESP32-WROOM-32 actúa como el “cerebro” del prototipo, permitiendo un riego automatizado eficiente y basado en las necesidades reales del cultivo.

1.4.3.2 Sensor DHT11 (Temperatura y Humedad Relativa)

El DHT11 es un sensor digital de bajo costo ampliamente utilizado para la medición simultánea de temperatura del aire y humedad relativa, dos variables fundamentales para el análisis del microclima agrícola. Su funcionamiento se basa en un sistema integrado de adquisición digital que combina un sensor resistivo de humedad y un termistor NTC, junto con un microcontrolador interno encargado de realizar la compensación, calibración y conversión del dato en una señal digital estable [11].

Características principales del DHT11

De acuerdo con su hoja técnica oficial, el DHT11 posee las siguientes especificaciones relevantes [11]:

- Rango de humedad: 20–90 % HR
- Rango de temperatura: 0–50 °C
- Precisión de humedad: ± 5 % HR
- Precisión de temperatura: ± 2 °C
- Resolución: 1 °C y 1 % HR
- Tiempo de respuesta: 6 a 15 segundos
- Voltaje de operación: 3–5.5 V
- Consumo de corriente: ~ 0.5 mA durante la medición

Cada unidad es calibrada en laboratorio y almacena sus coeficientes de calibración en memoria OTP, lo que garantiza estabilidad y repetibilidad en las mediciones. Además, su interfaz digital de un solo cable permite efectuar una transmisión completa de datos en paquetes de 40 bits, compuestos por información de humedad, temperatura y un byte de verificación.

Estas propiedades hacen que el DHT11 sea adecuado para monitoreos básicos del microclima con una frecuencia de muestreo no menor a 1 segundo, según especifica el fabricante.



Figura 1.5 Sensor DHT11 para lectura de temperatura y humedad relativa.

Importancia del DHT11 dentro del proyecto

En el prototipo de análisis de microclima y riego automatizado basado en DPV, el DHT11 juega un rol determinante al proporcionar las dos variables requeridas para calcular el Déficit de Presión de Vapor (DPV):

- Temperatura del aire (°C)
- Humedad relativa (%)

El DPV se obtiene aplicando la ecuación psicrométrica correspondiente, por lo que el sensor funciona como la principal fuente de información climática en tiempo real. Con estos datos, el sistema puede estimar el estado fisiológico del cultivo, detectar momentos de estrés atmosférico y activar la irrigación cuando el DPV supera los umbrales establecidos para evitar deshidratación foliar o excesiva transpiración.

Adicionalmente, la compatibilidad del DHT11 con el ESP32-WROOM-32 permite:

- Integrar la medición ambiental al algoritmo de control del riego.
- Registrar datos históricos en una base de datos mediante Wi-Fi.
- Monitorear remotamente la temperatura y humedad del invernadero o microambiente.

Ventajas del DHT11 en sistemas agrícolas

- Es económico y fácil de implementar.
- Tiene bajo consumo energético, ideal para proyectos de IoT agrícola.
- Su formato compacto permite ubicarlo en zonas críticas del cultivo sin interferencias.
- Tolera distancias de transmisión de hasta 20 metros con resistencias adecuadas, facilitando instalaciones distribuidas.
- Posee un tiempo de respuesta aceptable para aplicaciones de riego donde no se requiere muestreo en milisegundos.

Estas características garantizan que el sensor sea adecuado para detectar cambios ambientales moderados y ajustar la dinámica de riego en función del DPV, lo cual mejora el uso del agua y evita el estrés ambiental en las plantas.

1.4.3.3 Sensor FC-28 Humedad del suelo

El sensor FC-28 es un dispositivo ampliamente utilizado en proyectos de agricultura inteligente debido a su capacidad para estimar el contenido de humedad del suelo mediante un principio de conductividad eléctrica. Este sensor dispone de dos partes:

1. Las sondas metálicas, encargadas de medir la resistencia entre electrodos insertados en el sustrato, y
2. La tarjeta electrónica con comparador LM393, responsable de convertir la señal analógica en una salida digital ajustable mediante un potenciómetro.

Gracias a esta combinación, el módulo FC-28 permite obtener tanto una lectura analógica proporcional a la humedad del suelo, como una señal digital de umbral, lo que facilita su integración en sistemas automatizados de riego.

Principio de funcionamiento

El funcionamiento del FC-28 se basa en la variación de conductividad del suelo. Cuando el sustrato contiene mayor cantidad de agua, su resistencia disminuye y, por lo tanto, la señal analógica aumenta. En condiciones de suelo seco, la resistencia incrementa significativamente y la salida analógica disminuye. Esta conversión de impedancia es acondicionada por el comparador LM393, un circuito integrado capaz de operar con baja corriente y amplio rango de voltaje de alimentación (de 2 a 36 V), características que lo hacen adecuado para aplicaciones alimentadas desde microcontroladores como el ESP32 [12].

El LM393 genera una salida digital tipo "0/1" basada en un nivel de referencia ajustable mediante el potenciómetro integrado. Esto permite establecer un umbral de activación para encender una bomba o activar una alarma cuando el suelo alcanza un nivel crítico de sequedad.



Figura 1.6 Sensor humedad del suelo FC-28 Higrómetro

Características principales del FC-28

A partir del análisis del módulo y del datasheet del LM393, las características relevantes para este proyecto son las siguientes:

- Voltaje de operación: 3.3 V – 5 V
- Salidas disponibles:
 - AO (Analógica): valor proporcional al contenido de humedad
 - DO (Digital): activada mediante comparador LM393
- Consumo de corriente: muy bajo (<10 mA)
- Ajuste de sensibilidad: mediante potenciómetro en la placa
- Compatibilidad: puede conectarse directamente a entradas ADC del ESP32
- Respuesta: adecuada para monitoreo de riego, aplicaciones educativas e IoT agrícola

Estas propiedades permiten usar el FC-28 como un sensor económico, sencillo y funcional para medir el estado hídrico de la raíz, aspecto esencial para un sistema basado en la demanda real de agua según el microclima.

Ventajas del FC-28 para el sistema de riego

- Fácil instalación dentro o cerca de la raíz.
- Costo reducido, apropiado para prototipos académicos y desarrollos MVP.
- Salida analógica compatible con ADC del ESP32, sin necesidad de circuitos adicionales.
- Salida digital con comparador LM393, útil para activar directamente actuadores simples.
- Sensibilidad configurable, adaptándose a diferentes tipos de sustrato.

Aunque sensores capacitivos más avanzados ofrecen mayor estabilidad a largo plazo, el FC-28 es ideal para proyectos de bajo costo, investigación, tesis y pruebas funcionales en campo controlado.

1.4.3.4 Sensor ultrasónico HC-SR04 para medición de lámina de agua

En el desarrollo del prototipo, se incorporó el sensor ultrasónico HC-SR04 como elemento principal para la medición indirecta de la lámina de agua presente en el sistema suelo–riego. A diferencia de los sensores de humedad del suelo, cuya respuesta se ve afectada por la compactación, la conductividad eléctrica y la textura del sustrato, el sensor ultrasónico permite medir directamente el nivel del agua en términos geométricos, proporcionando una referencia más estable y repetible para el control del riego.

El sensor HC-SR04 opera bajo el principio de tiempo de vuelo de ondas ultrasónicas, emitiendo un pulso acústico de alta frecuencia (40 kHz) que se refleja sobre la superficie del agua y retorna al sensor. A partir del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso, se calcula la distancia utilizando la velocidad del sonido en el aire. Esta distancia se relaciona directamente con la altura de la lámina de agua, lo que permite expresar la variable

medida en centímetros, y posteriormente escalarla a un rango normalizado de 0 a 1 para su uso en el controlador PI.

El empleo del sensor ultrasónico se fundamenta además en la teoría de Bernoulli aplicada al sistema de riego, donde la altura de la lámina de agua constituye una variable representativa del estado hidráulico del sistema. De esta manera, la medición de nivel permite inferir de forma indirecta el equilibrio entre el caudal de entrada y el drenaje del sustrato, siendo especialmente útil para dinámicas rápidas de riego.

Una ventaja adicional del HC-SR04 es que su medición no depende del color, la conductividad ni la composición del agua, siempre que se garantice una superficie de reflexión estable. Para evitar errores asociados a la presencia de agua turbia o residuos sólidos, se desarrolló un sistema mecánico auxiliar con flotador, asegurando una superficie de medición adecuada y reduciendo la dispersión de las lecturas.

Características técnicas relevantes del sensor HC-SR04

Según la hoja de datos del fabricante, el sensor ultrasónico HC-SR04 presenta las siguientes especificaciones principales [13]:

- Voltaje de alimentación: 5 V DC
- Corriente de operación: \approx 15 mA
- Rango de medición: 2 cm – 400 cm
- Resolución: aproximadamente 0.3 cm
- Frecuencia de operación: 40 kHz
- Ángulo efectivo de medición: $< 15^\circ$
- Tipo de señal: digital (pulso de tiempo proporcional a la distancia)

Estas características lo convierten en un sensor adecuado para la medición de láminas de agua en el rango de 0.3 mm hasta 2 cm,

requerido en el presente trabajo. Asimismo, su bajo costo, facilidad de integración con microcontroladores como el ESP32 y amplia documentación disponible lo hacen apropiado para aplicaciones de automatización agrícola de bajo costo.



Figura 1.7 Sensor ultrasónico HC-SR04 utilizado para la medición de la lámina de agua en el sistema de riego.

1.4.3.5 Driver L298N – Controlador de potencia

El L298N es un circuito integrado monolítico diseñado para el control de cargas inductivas de media potencia, tales como motores DC, solenoides, relés o bombas. En este proyecto de riego automatizado basado en microclima y DPV, el L298N se emplea específicamente como driver de potencia para accionar y regular la bomba de diafragma mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), permitiendo ajustar el caudal de agua en función de las necesidades del cultivo.

Este dispositivo integra dos puentes H completos capaces de manejar tensiones de hasta 46 V y corrientes continuas de 2 A por canal, lo cual lo convierte en una solución adecuada para el control de actuadores de riego que requieren estabilidad, protección térmica y respuesta rápida. Su compatibilidad con niveles lógicos TTL permite conectarlo directamente al microcontrolador ESP32-WROOM-32 sin necesidad de convertidores de señal adicionales [14].

Características principales del L298N

Según el datasheet oficial de STMicroelectronics, el L298N ofrece características clave para aplicaciones agrícolas automatizadas [14]:

- Tensión de alimentación VS: hasta 46 V
- Corriente máxima por canal: 2 A (3 A en picos cortos no repetitivos)
- Doble puente H integrado (dos cargas independientes o un motor/bomba bidireccional)
- Alta inmunidad al ruido y lógica de control TTL
- Protección por sobret temperatura
- Pins de sensado de corriente (Sense A y Sense B)
- Frecuencia de conmutación recomendada: hasta 25–40 kHz
- Bajo voltaje de saturación en los transistores

Estas características permiten al módulo operar con estabilidad aun cuando la bomba genera picos transitorios y pulsos inductivos propios de cargas mecánicas.



**Figura 1.8 Módulo Driver
L298N**

1.4.3.6 Bomba de diafragma R385 – Actuador de riego

La bomba de diafragma R385 es el actuador principal del sistema de riego automatizado, responsable de impulsar el agua hacia el cultivo cuando el microcontrolador detecta condiciones de estrés hídrico basadas en el DPV y la humedad del suelo. Esta bomba

funciona con voltaje DC entre 6 y 12 V, tiene un consumo típico de 0.5–0.7 A, y es capaz de suministrar un caudal aproximado de 1.5 a 2 L/min, lo cual la hace adecuada para sistemas de riego pequeños, invernaderos didácticos y prototipos académicos [15].

Su diseño basado en diafragma permite manejar agua sin riesgo de retorno hacia el motor, proporcionando un funcionamiento seguro, estable y libre de fugas. Además, posee una vida útil de hasta 2500 horas, una altura máxima de succión cercana a 2 metros, y soporta temperaturas del agua de hasta 80 °C, lo cual asegura versatilidad en diversas condiciones de trabajo.

En este proyecto, la bomba es controlada mediante un driver L298N utilizando la técnica PWM, lo que permite variar su velocidad y caudal de acuerdo con la demanda del cultivo. Esto resulta fundamental para aplicar riegos suaves, moderados o intensos según el estado del microclima, optimizando el uso del agua y evitando estrés en las plantas. Gracias a su tamaño compacto y su compatibilidad con sistemas de 12 V, la R385 se integra fácilmente al prototipo, garantizando un riego preciso, confiable y ajustado a las condiciones ambientales registradas.

1.4.4 Algoritmo de control PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un mecanismo de retroalimentación clásico ampliamente utilizado en la regulación de procesos industriales, que combina tres acciones de control para lograr una respuesta estable en la variable regulada. Cada término de esta estrategia actúa sobre el error de control $e(t)$ (la diferencia entre el punto de consigna (setpoint, SP) y la variable de proceso medida (PV)) de distinta manera: la acción proporcional reacciona al error presente, la integral acumula errores pasados y la derivativa predice errores futuros. La señal de control $u(t)$ resultante se calcula sumando estas tres contribuciones, permitiendo ajustar el actuador (por ejemplo, la apertura de una válvula o la potencia de

una bomba) para minimizar el error de forma continua. En la práctica, un controlador PID mejora significativamente la rapidez de respuesta del sistema y la precisión en la regulación de variables críticas (como flujo o humedad del suelo), aunque su correcta sintonización es esencial para evitar oscilaciones y garantizar estabilidad.

Formulación matemática del PID.

En tiempo continuo, la forma más común del controlador PID se expresa mediante una ecuación diferencial que combina proporcional, integral y derivativo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1.4)$$

Aquí $e(t) = SP - PV(t)$ es el error entre la consigna y la salida del proceso, y K_p , K_i , K_d son las ganancias o constantes del controlador asignadas a cada acción. El término proporcional $K_p \cdot e(t)$ genera una acción de control directamente proporcional al error actual; el término integral $K_i \int e(t) \cdot dt$ corrige desviaciones persistentes acumulando errores pasados; y el término derivativo $K_d \cdot (de(t)/dt)$ atenúa el efecto del cambio rápido del error, anticipando la tendencia del sistema. Esta ecuación diferencial resumida permite implementar el PID en controladores analógicos o mediante software de tiempo real.

En el dominio de la frecuencia (Laplace), se define la función de transferencia del PID como la suma de sus acciones en transformada de Laplace:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (1.5)$$

De este modo, el controlador puede representarse como un sistema dinámico en serie (o paralelo no interactivo) con ganancia proporcional, un

integrador y un derivador. Formalmente, el término integral introduce un polo en $s=0$ (acción acumulativa) y el derivativo introduce un cero, modelando la fase adelantada. Según ISA, la forma paralela (no interactiva) $C(s)=K_p + K_i(1/s) + K_d*s$ es el estándar más utilizado. En análisis de lazo abierto, la función de transferencia del controlador contribuye al comportamiento global del lazo: al multiplicarse por la planta, determina la respuesta temporal del sistema y su margen de estabilidad.

Variables de referencia en sistemas de control de riego agrícola

En los sistemas de riego automatizado, la selección de la variable de referencia es un aspecto clave para el desempeño del control. Esta variable debe representar el estado hídrico del cultivo y, al mismo tiempo, ser medible de forma estable y reproducible dentro del sistema.

La humedad del suelo es ampliamente utilizada como indicador del estado hídrico, ya que se relaciona directamente con la disponibilidad de agua en la zona radicular. Sin embargo, en suelos arcillosos o sometidos a riegos frecuentes, esta variable presenta alta variabilidad debido a procesos de saturación, asentamiento, cambios de porosidad e histéresis, lo que dificulta su uso como referencia directa de control. Por esta razón, la humedad del suelo se considera una variable indirecta, adecuada para monitoreo y análisis agronómico.

Por otro lado, variables hidráulicas como el caudal de riego y la lámina de agua son directamente manipulables mediante actuadores, lo que las convierte en referencias más adecuadas desde el punto de vista del control automático. En particular, la lámina de agua permite una medición más estable y una dinámica más predecible, facilitando el diseño de sistemas de control robustos.

En este contexto, resulta conveniente emplear las variables de suelo y microclima como criterios de análisis y decisión, mientras que el control

actúa sobre una variable directa, garantizando una regulación eficiente del riego. La selección específica de la variable controlada se aborda en la metodología experimental del presente trabajo.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental–aplicado, orientado al diseño, implementación y validación de un sistema de riego automatizado basado en el análisis del microclima y el control de variables hidráulicas. El carácter experimental del estudio permitió observar, medir y analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones controladas, mientras que el enfoque aplicado se centró en la solución de un problema real relacionado con el manejo del riego agrícola en cultivos de albahaca.

El enfoque metodológico fue cuantitativo, ya que el estudio se basó en la adquisición y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de sensores ambientales y experimentos controlados. Las variables consideradas incluyeron temperatura, humedad relativa, Déficit de Presión de Vapor (DPV), humedad del suelo, caudal de riego y lámina de agua, las cuales fueron registradas y analizadas para caracterizar el comportamiento del sistema y fundamentar las decisiones de diseño.

Con el fin de garantizar una comprensión integral del problema, la investigación se estructuró en etapas secuenciales, combinando ensayos de campo y pruebas de laboratorio. Las actividades de campo estuvieron orientadas a la caracterización del microclima y la evaluación del comportamiento hídrico del cultivo bajo distintas condiciones ambientales, mientras que las pruebas de laboratorio se enfocaron en la evaluación de sensores, la identificación experimental del sistema de riego y el diseño del controlador.

Esta división metodológica permitió analizar de forma progresiva la relación causa–efecto entre las variables microclimáticas, el riego aplicado y la respuesta del sistema, asegurando que cada etapa aportara información relevante para la siguiente. De esta manera, el enfoque metodológico adoptado resultó adecuado

para cumplir con los objetivos del estudio y para desarrollar una solución de riego automatizado coherente con las condiciones reales del entorno agrícola.

2.2 Alternativas de solución

Con el objetivo de abordar el problema del riego agrícola bajo condiciones microclimáticas variables, se analizaron diferentes alternativas de solución comúnmente empleadas en sistemas de riego automatizado. Este análisis permitió comparar enfoques tradicionales y modernos, considerando criterios de control, estabilidad del sistema, complejidad de implementación y adaptabilidad a las condiciones reales del cultivo.

Riego por tiempo

El riego por tiempo consiste en la activación del sistema de riego durante intervalos predeterminados, sin considerar de manera directa el estado hídrico del suelo ni las condiciones microclimáticas. Este enfoque es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y bajo costo de implementación. No obstante, presenta limitaciones importantes, ya que no se adapta a variaciones de temperatura, humedad relativa o radiación solar, factores que influyen directamente en la demanda hídrica del cultivo.

Durante el análisis de esta alternativa se identificó que el riego por tiempo puede generar condiciones de sobre-riego o déficit hídrico, especialmente en escenarios donde el microclima presenta cambios significativos a lo largo del día. Por esta razón, esta estrategia fue considerada insuficiente para garantizar un manejo eficiente del riego.

Riego con referencia en la humedad del suelo

El riego basado en la medición de la humedad del suelo utiliza sensores para estimar la cantidad de agua disponible en la zona radicular del cultivo. Esta alternativa ofrece una mayor relación con el estado hídrico del suelo en comparación con el riego por tiempo y permite una respuesta más ajustada a las necesidades del cultivo.

Sin embargo, el análisis conceptual de esta estrategia evidenció que la medición de la humedad del suelo puede verse afectada por la heterogeneidad del suelo, los procesos de saturación, la redistribución del agua y la variabilidad en la densidad del medio. Estas características dificultan la obtención de una señal estable y reproducible, lo que limita su uso como referencia directa en sistemas de control automático, particularmente en suelos arcillosos sometidos a riegos frecuentes.

Riego con referencia en la lámina de agua

El riego basado en la regulación de la lámina de agua se fundamenta en el control del volumen de agua almacenado en el sistema mediante la medición de su altura. Esta alternativa presenta una relación directa con los actuadores hidráulicos y permite una representación más clara del balance de agua aplicado.

Desde el punto de vista del control automático, la lámina de agua constituye una variable física directamente manipulable y con una dinámica más predecible, lo que facilita su modelado matemático y su integración en estrategias de control. Además, su medición puede realizarse sin contacto directo con el suelo, reduciendo la influencia de las variaciones físicas del medio.

Sistemas comerciales e industriales de riego

Los sistemas comerciales e industriales de riego incorporan sensores de alta precisión, controladores programables y plataformas de monitoreo avanzadas. Si bien estos sistemas ofrecen altos niveles de desempeño y confiabilidad, su implementación suele implicar costos elevados, complejidad técnica y dependencia de infraestructura especializada.

En el contexto del presente estudio, este tipo de soluciones fue considerado poco viable para aplicaciones de pequeña escala o de carácter experimental, donde se requiere una solución flexible, de bajo costo y adaptable a condiciones locales.

Selección de la alternativa de solución

A partir del análisis realizado, se seleccionó la alternativa de control de riego con referencia en la lámina de agua, debido a su mayor estabilidad como variable de control, su relación directa con los actuadores del sistema y su viabilidad para ser modelada e integrada en un esquema de control automático. Esta elección permitió establecer una base sólida para el desarrollo del sistema de riego propuesto, manteniendo las variables microclimáticas y de suelo como elementos de análisis y apoyo para la toma de decisiones agronómicas.

2.3 Caracterización experimental del microclima (DPV).

La caracterización experimental del microclima se realizó con el propósito de analizar las condiciones ambientales que influyen en el estado hídrico del cultivo y en la demanda de riego. Para ello, se llevaron a cabo mediciones de temperatura y humedad relativa del aire, variables necesarias para la obtención del Déficit de Presión de Vapor (DPV), el cual constituye un indicador del estrés hídrico potencial de la planta.

Las mediciones se realizaron utilizando sensores ambientales ubicados en proximidad al cultivo, asegurando que los datos representaran las condiciones reales del microclima al que estaba expuesta la planta. A partir de los valores de temperatura y humedad relativa se calculó el DPV mediante las expresiones psicrométricas correspondientes, permitiendo evaluar la influencia del ambiente sobre el proceso de transpiración.

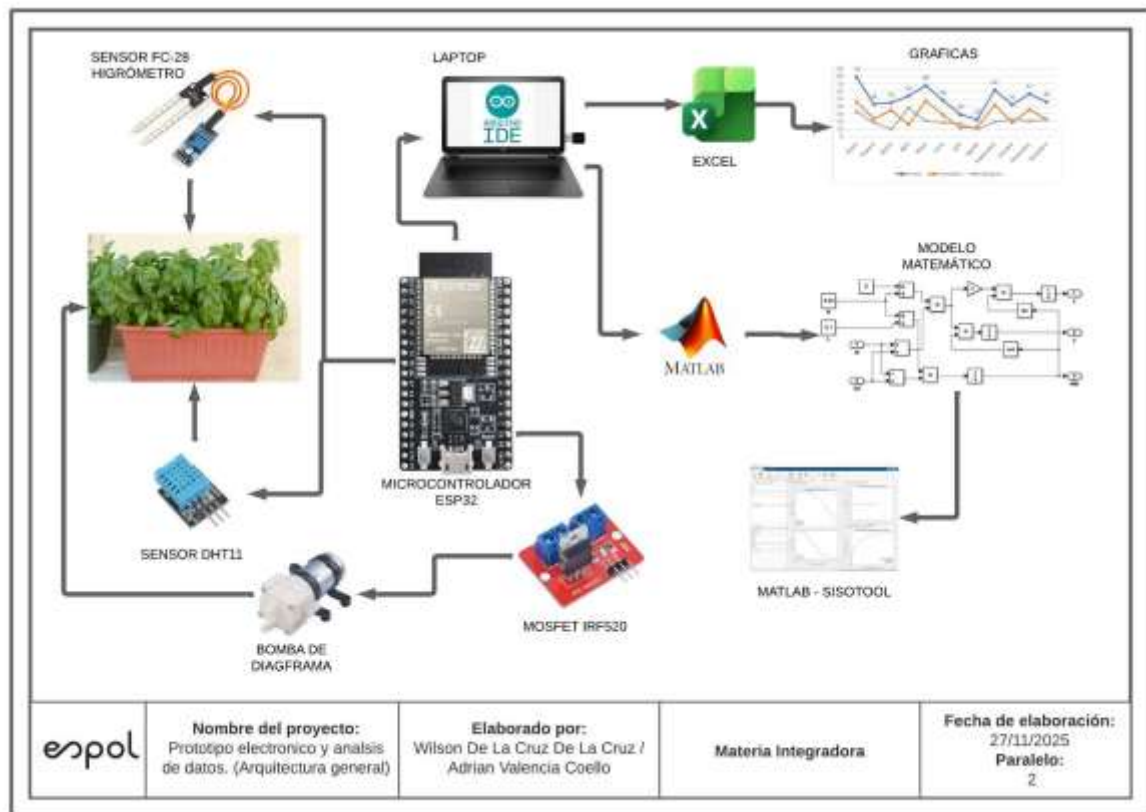


Figura 2.1 Arquitectura general del prototipo electrónico para el análisis del microclima y el control automatizado del riego.

Con el fin de analizar el comportamiento del microclima bajo distintas condiciones, se diseñaron y ejecutaron varios ensayos experimentales. En una primera etapa, se evaluó el comportamiento del sistema con la maceta expuesta directamente a la radiación solar durante diferentes periodos del día. Adicionalmente, se realizaron ensayos de riego por horario, en los cuales el suministro de agua se efectuó en intervalos predefinidos, así como ensayos de riego por inundación, donde se aplicó un volumen mayor de agua en un corto periodo de tiempo.



Figura 2.2 Arquitectura general del prototipo electrónico para el análisis del microclima y el control automatizado del riego.

Asimismo, se desarrolló un ensayo controlado mediante la implementación de un domo que limitó la ventilación natural del entorno, combinado con la aplicación de calor artificial mediante una secadora. Este procedimiento permitió generar condiciones de mayor temperatura y menor humedad relativa, simulando escenarios de estrés térmico e hídrico sobre el cultivo.

Como complemento a las mediciones experimentales, se incorporaron datos meteorológicos de la ciudad de Guayaquil, los cuales proporcionaron información adicional sobre la radiación solar y las condiciones ambientales generales del entorno. Estos datos fueron utilizados como referencia para contextualizar los ensayos realizados y establecer una relación entre el microclima local y las condiciones climáticas de la región.

La Tabla 2.1 resume las condiciones generales de los ensayos realizados, incluyendo el tipo de riego aplicado, la duración de cada prueba y las variables medidas.

Tabla 2.1 Ensayos realizados para la caracterización experimental del microclima

Ensayo	Condición experimental	Tipo de riego aplicado	Duración aproximada	Variables medidas
E1	Maceta expuesta a radiación solar directa	Sin riego durante el ensayo	Varias horas durante el día	Temperatura, Humedad Relativa, DPV
E2	Maceta expuesta a radiación solar directa	Riego por horario	Varias horas durante el día	Temperatura, Humedad Relativa, DPV

Ensayo	Condición experimental	Tipo de riego aplicado	Duración aproximada	Variables medidas
E3	Maceta expuesta a radiación solar directa	Riego por inundación	Corto periodo de tiempo	Temperatura, Humedad Relativa, DPV
E4	Maceta bajo domo con ventilación limitada	Sin riego durante el ensayo	Periodo controlado	Temperatura, Humedad Relativa, DPV
E5	Maceta bajo domo con aplicación de calor artificial (secadora)	Sin riego durante el ensayo	Periodo controlado	Temperatura, Humedad Relativa, DPV
E6	Referencia climática regional (Guayaquil)	No aplica	Datos diarios	Temperatura, Humedad Relativa, Radiación solar

2.4 Evaluación experimental de la medición de la humedad del suelo

En esta etapa se llevó a cabo la evaluación experimental de la medición de la humedad del suelo, con el objetivo de analizar la respuesta de distintos sensores y configuraciones de riego bajo diferentes condiciones físicas del medio. El propósito de esta evaluación fue comprender la dinámica del contenido hídrico del suelo y su viabilidad como variable indicativa dentro del sistema de riego.

Inicialmente, se evaluó una estrategia de riego basada en la aplicación de un volumen fijo de agua durante intervalos de tiempo definidos, manteniendo el sistema en operación durante un periodo aproximado de 21 días. Estos ensayos se realizaron tanto en macetas como en gavetas, considerando que una aplicación gradual del riego permitiría observar una variación progresiva en la humedad del suelo. Sin embargo, durante este periodo se observó que la señal de humedad presentaba incrementos abruptos, sin una dinámica gradual claramente definida, lo que dificultó su interpretación.



Figura 2.3 Montaje experimental para medición de humedad del suelo en maceta

Con el fin de mejorar la calidad de la medición, se sustituyeron los sensores resistivos por sensores capacitivos de humedad del suelo versión 1.2, instalados en el mismo recipiente. Esta modificación permitió reducir el ruido presente en la señal, obteniéndose lecturas más estables. No obstante, aun con esta mejora, no se evidenció una dinámica progresiva de la humedad que reflejara de manera consistente la aplicación del riego.

Posteriormente, se evaluó la influencia de la ubicación del sensor mediante la instalación de dos sensores capacitivos en diferentes posiciones dentro del mismo recipiente. A pesar de este ajuste, la respuesta de la humedad del suelo continuó presentando limitaciones, lo que sugirió que factores asociados al tipo de suelo y al método de riego estaban influyendo significativamente en la medición.

En una etapa posterior, se modificó el recipiente y se mantuvo el mismo tipo de suelo de abono, aplicando un riego puntual. Se instalaron tres sensores de humedad del suelo distribuidos a diferentes profundidades con el objetivo de observar la propagación del agua en el perfil del suelo. En este caso, se observó que el suelo de abono permitía una rápida filtración del agua, sin generar un asentamiento adecuado que facilitara una variación progresiva de la humedad medida por los sensores.



Figura 2.4 Distribución de sensores de humedad del suelo a diferentes profundidades

Con el propósito de evaluar el efecto del tipo de suelo, se realizaron ensayos utilizando suelo arcilloso y aplicando riego puntual mediante una botella. Bajo estas condiciones se esperaba una mayor retención de agua; sin embargo, la dinámica de la humedad continuó siendo limitada o demasiado rápida para ser captada de manera adecuada por los sensores instalados.

Finalmente, se implementó un sistema de riego radial utilizando venocllisis, con el fin de distribuir el agua de manera más uniforme sobre la superficie del suelo. En este escenario se instalaron tres sensores capacitivos de humedad del suelo ubicados a diferentes profundidades, separados aproximadamente por 10 cm. Bajo esta configuración se observó una respuesta progresiva de la humedad, iniciando en el sensor más cercano a la superficie, seguida por el sensor intermedio y, posteriormente, por el sensor ubicado en la parte inferior del recipiente.



Figura 2.5 Sistema de riego radial mediante venoclisis

No obstante, durante estos ensayos se identificaron comportamientos no deseados en el sensor ubicado en la capa superficial, el cual presentó variaciones abruptas en la lectura de humedad. Este comportamiento se asoció a cambios en la densidad del suelo en la superficie, producto del peso del agua aplicada y de la formación de lodo, lo que afectó la referencia física del sensor.

A partir de estos ensayos se evidenció que la medición de la humedad del suelo se encuentra influenciada por múltiples factores, entre ellos el tipo de suelo, el método de riego, la geometría del recipiente y la ubicación de los sensores. Estas observaciones permitieron establecer criterios experimentales para la selección de una variable de control más estable, lo cual se aborda en la sección siguiente.

2.5 Selección de la variable de control: lámina de agua

A partir de la caracterización del microclima y del análisis del Déficit de Presión de Vapor (DPV), se identificó que la demanda hídrica del cultivo se encuentra fuertemente condicionada por las variaciones ambientales. En este contexto, la formación de una lámina de agua se relacionó directamente con la necesidad de compensar el aumento del DPV.

En los ensayos realizados con sensores resistivos FC-28, tanto en condiciones de aire como enterrados y utilizando configuraciones con uno y dos sensores, se observó que la respuesta del sensor variaba considerablemente ante cambios locales del suelo y del contenido de agua. De forma similar, los sensores capacitivos instalados de manera lateral mostraron mejoras en la estabilidad eléctrica de la señal; sin embargo, su respuesta continuó estando condicionada por la dinámica no lineal del suelo, especialmente en escenarios de saturación y formación de lodo.



Figura 2.6 Ensayos con los sensores resistivos y capacitivos V1.2

Desde el punto de vista físico, la humedad del suelo representa una variable indirecta del proceso de riego, ya que no se encuentra directamente relacionada con la acción del actuador hidráulico. En contraste, la lámina de agua constituye una variable directamente manipulable, definida como la altura del volumen de agua almacenado en el sistema, y mantiene una relación directa con el caudal de entrada y salida.

La lámina de agua presenta una dinámica más predecible y puede describirse mediante principios de conservación de masa, lo que facilita su modelado matemático y su integración en estrategias de control automático. Adicionalmente, su medición permite desacoplar el sistema de control del comportamiento no lineal

del suelo, proporcionando una referencia más estable para el diseño del controlador.

Con base en estas consideraciones, se optó por emplear un sensor ultrasónico para la medición de la lámina de agua, evitando el contacto directo con el suelo saturado. Esta elección permitió reducir la influencia de la densidad del suelo, la formación de lodo y los cambios de referencia observados en las mediciones de humedad.

Para mejorar la calidad de la medición y minimizar el ruido asociado a perturbaciones locales, se diseñó un sistema de medición basado en un tubo de calma con filtrado lateral. Este dispositivo permitió el ingreso únicamente del agua al interior del tubo, evitando la entrada de partículas sólidas y asegurando una referencia geométrica fija para la medición del nivel. De esta manera, la señal obtenida representó de forma más fiel la variación de la lámina de agua generada por el riego aplicado.



Figura 2.7 Diseño del tubo de calma con filtrado lateral para medición de nivel

La selección de la lámina de agua como variable de control estableció una base sólida para la identificación experimental del sistema de riego y el posterior diseño del controlador, etapas que se desarrollan en las secciones siguientes.

2.6 Identificación experimental del sistema de riego.

La identificación experimental del sistema de riego se realizó con el objetivo de obtener los parámetros necesarios para describir el comportamiento dinámico del proceso y establecer una base adecuada para el diseño del sistema de control. Esta etapa se enfocó en caracterizar experimentalmente los principales elementos que conforman la planta: el actuador hidráulico (bomba), el recipiente de almacenamiento y el suelo, considerado como una resistencia hidráulica.

La identificación se llevó a cabo mediante ensayos controlados en condiciones de laboratorio, aplicando señales de entrada conocidas y registrando la respuesta del sistema en términos de caudal y variación de la lámina de agua. Los procedimientos empleados se describen a continuación.

Ensayo de identificación de la bomba

Para la identificación de la dinámica de la bomba utilizada en el sistema de riego, se realizaron ensayos aplicando señales de entrada constantes mediante modulación por ancho de pulso (PWM). Durante estos ensayos, la bomba fue activada desde condiciones iniciales de reposo y se registró la respuesta temporal del caudal generado.

El procedimiento consistió en fijar un valor de señal de control y medir el tiempo requerido para que el caudal alcanzara un régimen estable. A partir de estas mediciones se evaluaron parámetros dinámicos característicos, tales como la ganancia estática del sistema, la constante de tiempo y el retardo asociado al inicio del flujo. Estos ensayos permitieron observar el comportamiento transitorio de la bomba y su respuesta ante cambios en la señal de control.

Los datos obtenidos fueron registrados para su posterior análisis y modelado, sin establecer aún una función de transferencia definitiva en esta etapa.



Figura 2.8 Montaje experimental para la identificación dinámica de la bomba

Caracterización geométrica del recipiente.

El recipiente utilizado para el almacenamiento del agua fue caracterizado con el fin de determinar su área transversal efectiva, parámetro necesario para relacionar el caudal con la variación de la lámina de agua. Para ello, se midieron las dimensiones geométricas del recipiente, considerando su forma y volumen útil.

Esta caracterización permitió establecer una relación directa entre el volumen de agua ingresado y el incremento de la altura de la lámina, facilitando posteriormente la formulación del modelo hidráulico del sistema.



Figura 2.9 Geometría y dimensiones del recipiente de almacenamiento

Ensayo del suelo como resistencia hidráulica

El suelo fue considerado como un elemento que introduce una resistencia al flujo de salida del sistema, afectando la dinámica de vaciado del recipiente. Para su caracterización, se realizaron ensayos controlados en los cuales se permitió la salida de agua desde el recipiente a través del suelo, registrando la variación temporal de la lámina de agua.

Durante estos ensayos se mantuvieron condiciones iniciales conocidas y se observó la velocidad de descenso del nivel de agua, permitiendo analizar el efecto del tipo de suelo y su estructura sobre el comportamiento hidráulico del sistema. Esta información fue utilizada posteriormente para representar el suelo como una resistencia equivalente dentro del modelo del sistema de riego.

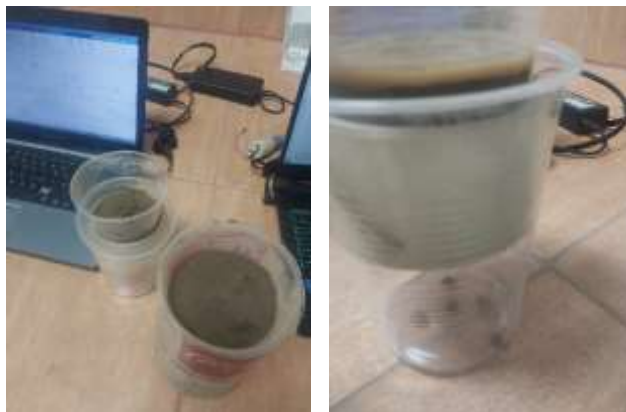


Figura 2.10 Ensayo experimental para la caracterización hidráulica del suelo

Procedimiento general de medición y adquisición de datos.

Las mediciones realizadas durante los ensayos de identificación se efectuaron utilizando sensores de nivel y dispositivos de adquisición conectados a la unidad de procesamiento. Los datos fueron registrados en intervalos de tiempo constantes, asegurando la repetibilidad de las pruebas y la trazabilidad de los resultados obtenidos.

El procedimiento general incluyó la inicialización del sistema, la aplicación de la señal de entrada correspondiente, el registro continuo de la respuesta del sistema y el almacenamiento de los datos para su análisis posterior. Esta metodología

permitió obtener información experimental confiable para la identificación del sistema de riego.

2.7 Metodología de diseño y desarrollo

La metodología de diseño y desarrollo del prototipo se estructuró en etapas secuenciales que permitieron integrar de manera ordenada la medición del microclima, la identificación del sistema de riego y el diseño del control. Este enfoque garantizó la coherencia entre el comportamiento físico del sistema y la estrategia de control implementada.

Inicialmente, se definieron las variables relevantes del sistema a partir del análisis del microclima y del DPV, estableciendo la lámina de agua como variable controlada y la humedad del suelo como una condición de habilitación del riego. Con base en este planteamiento, se seleccionaron los componentes electrónicos y se diseñó la arquitectura general del sistema.

Posteriormente, se desarrolló el firmware del prototipo, incorporando los módulos de adquisición de datos, cálculo del DPV y generación de la señal de control aplicada al actuador hidráulico. Este desarrollo permitió asegurar la correcta sincronización de las mediciones y la ejecución del algoritmo de control conforme a los requerimientos del sistema.

Finalmente, se realizó la integración del hardware y la ejecución de pruebas experimentales para verificar el funcionamiento global del prototipo. Estas pruebas permitieron comprobar la correcta medición de las variables, la respuesta del sistema de riego y la viabilidad de la metodología de control propuesta.

La Figura X muestra el diagrama de flujo general de la metodología seguida para el diseño y desarrollo del sistema.

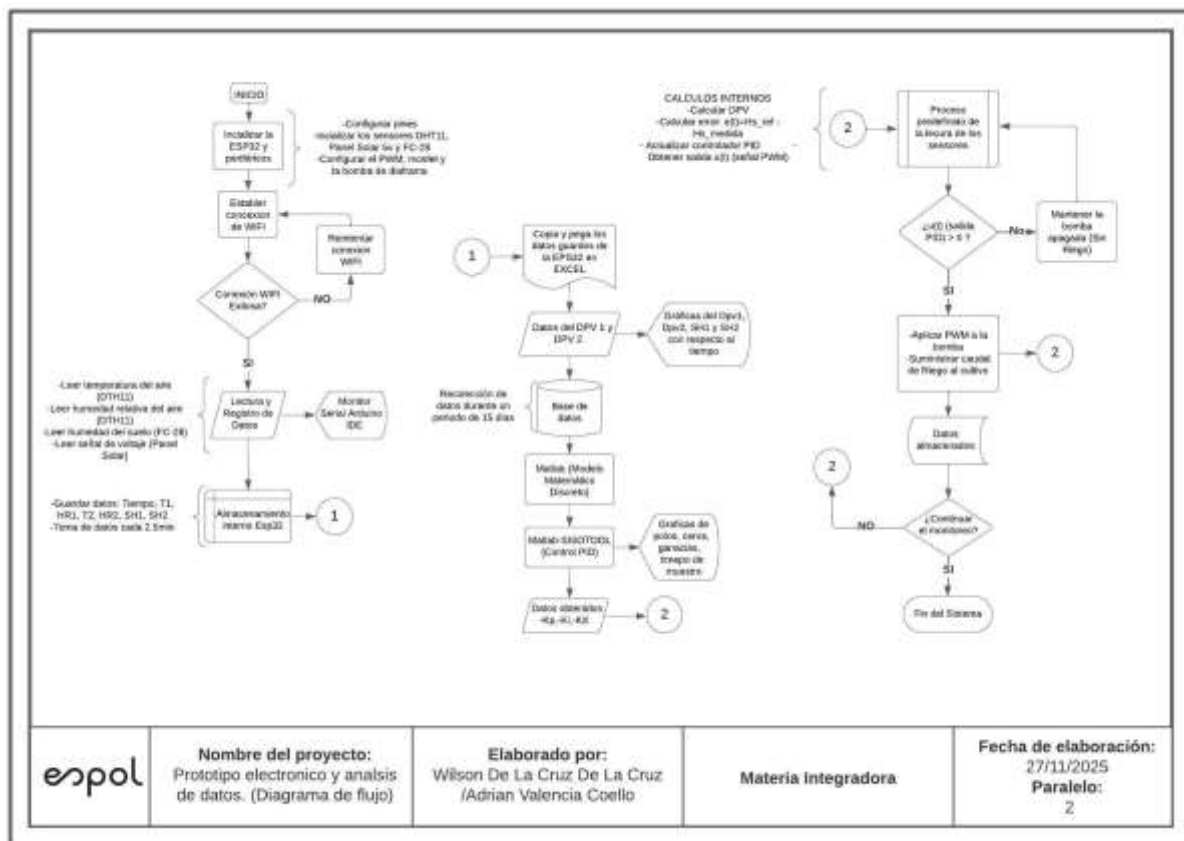


Figura 2.11 Diagrama de flujo del algoritmo de funcionamiento del prototipo electrónico.

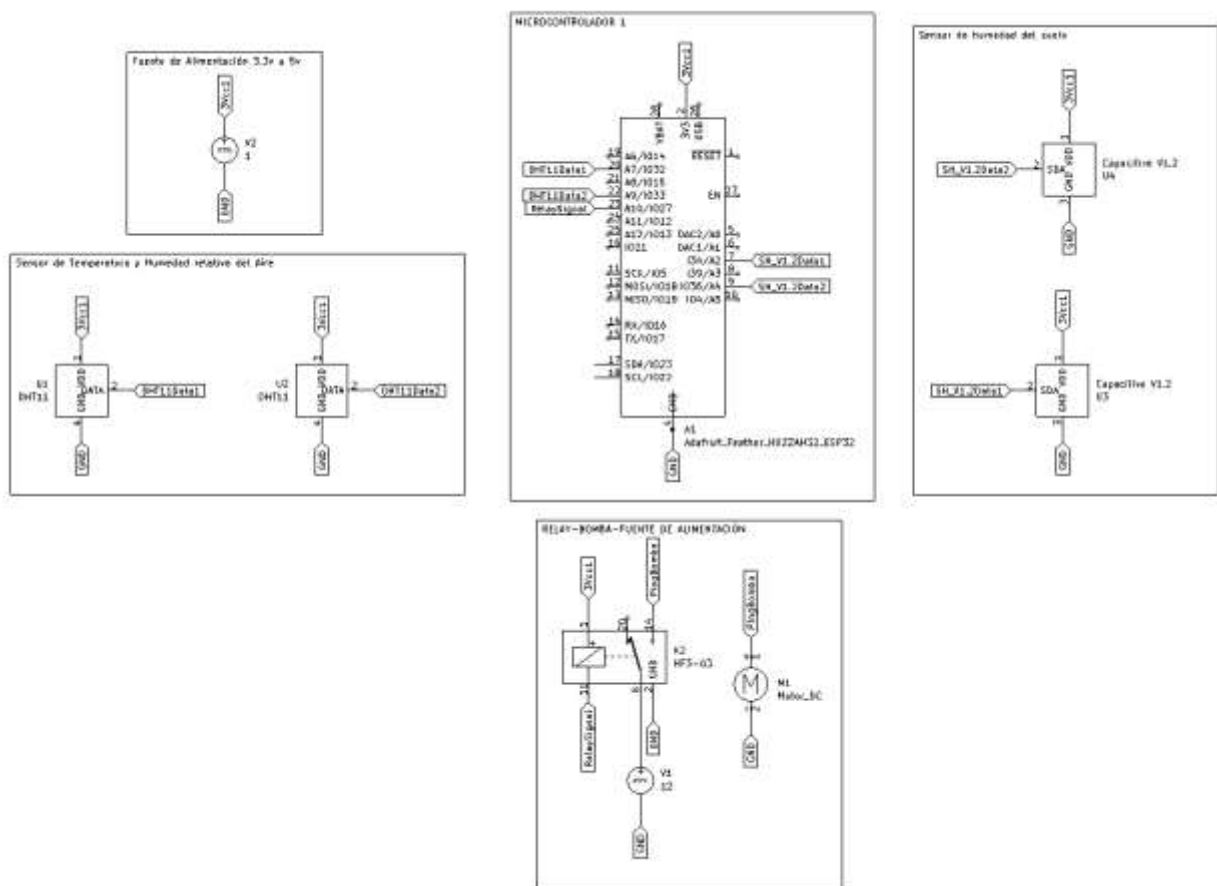
2.8 Diseño electrónico

El diseño electrónico del prototipo se desarrolló con el objetivo de integrar los sensores, el microcontrolador y el sistema de actuación hidráulica en un circuito estable, seguro y adecuado para el cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV) y la regulación automática del riego. Para ello, se definió la estructura eléctrica del sistema considerando los niveles de voltaje, la compatibilidad entre dispositivos y la necesidad de aislar la etapa de control de la etapa de potencia.

El sistema se alimentó mediante una fuente de 5 V para los sensores y el microcontrolador ESP32, y una fuente independiente de 12 V destinada a la bomba de diafragma utilizada para el riego. La separación de fuentes permitió evitar

fluctuaciones de voltaje en la etapa de control durante los arranques de la bomba, protegiendo al microcontrolador y garantizando la estabilidad del sistema.

Los sensores DHT11 y FC-28 se conectaron a las entradas digitales y analógicas del ESP32, respectivamente. El sensor DHT11 proporcionó lecturas digitales de temperatura y humedad relativa del aire, mientras que los sensores FC-28 entregaron señales analógicas relacionadas con la humedad del suelo, las cuales fueron procesadas mediante el ADC de 12 bits integrado en el ESP32. Adicionalmente, se utilizó un panel solar de 5 V como referencia indirecta de



Plano 2.1 Diagrama del sistema electrónico del prototipo.

Para la etapa de actuación se empleó un módulo MOSFET IRF520, encargado de controlar la bomba de diafragma mediante una señal PWM generada por el ESP32. Este módulo permitió manejar la corriente requerida por la bomba sin comprometer los pines del microcontrolador, además de ofrecer una respuesta modulada del

caudal de riego, acorde con la salida del controlador PID implementado en el firmware.

Con el fin de asegurar la claridad del diseño, se elaboró un diagrama esquemático que representa la interconexión eléctrica de todos los componentes, así como una distribución de equipos que detalla el cableado físico del prototipo. Asimismo, se presentó una tabla con la asignación de pines utilizada en el ESP32, la cual permitió organizar las conexiones y facilitar el proceso de integración y depuración durante las pruebas.

Tabla 2.2 Asignación de pines del ESP32 utilizados en el diseño electrónico.

Componente / Módulo	Pin ESP32	Tipo de Señal	Función asignada
Sensor DHT11– Punto 1	GPIO 4	Digital	Lectura de temperatura y humedad relativa (DHT1)
Sensor DHT11– Punto 2	GPIO 32	Digital	Lectura de temperatura y humedad relativa (DHT2)
Sensor Capacitive v1.2 –Suelo 1	GPIO 34	Analógica (ADC1)	Lectura de humedad del suelo SH1
Sensor Capacitive v1.2 – Suelo 2	GPIO 35	Analógica (ADC1)	Lectura de humedad del suelo SH2
MOSFET (Gate) IRF520	GPIO 19	PWM / Digital Output	Control de caudal de riego mediante señal PWM
Bomba	12 V externo	Digital	Alimentación independiente del sistema de control
GND	GND	Tierra	Retorno común del sistema
Alimentación ESP32	5V	Alimentación	Fuente principal del microcontrolador

Este diseño electrónico estableció la base funcional del prototipo, permitiendo la correcta adquisición de datos, el cálculo del DPV, la ejecución del control PID y la aplicación del riego automatizado al cultivo.

2.9 Metodología de diseño del controlador PI

El diseño del controlador se llevó a cabo a partir del modelo dinámico del sistema de riego, considerando la lámina de agua como variable controlada y la señal aplicada al actuador hidráulico como variable manipulada. El modelo de la planta fue obtenido mediante la identificación experimental descrita en la sección anterior, integrando la dinámica de la bomba, el recipiente y la resistencia hidráulica del suelo.

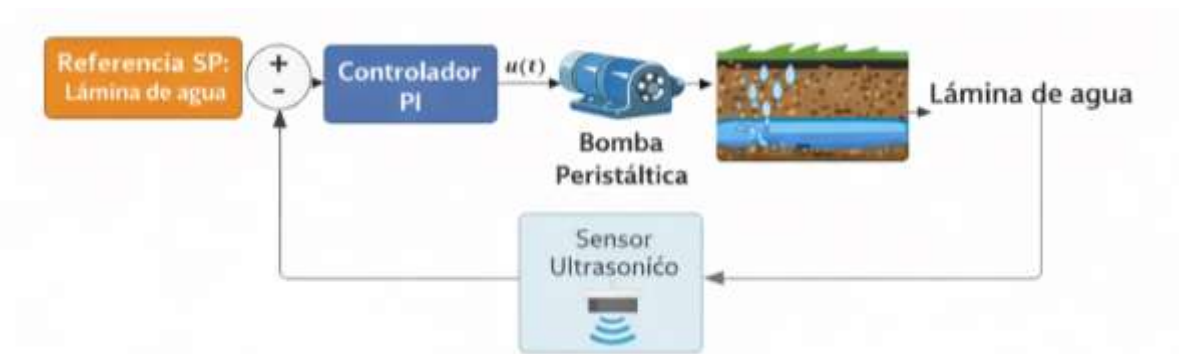


Figura 2.12 Modelo conceptual del sistema de riego para el diseño del controlador PI

Con base en este modelo, el controlador se diseñó en tiempo continuo, permitiendo analizar el comportamiento del sistema en el dominio de Laplace y aplicar técnicas clásicas de control. La formulación continua facilitó el estudio de la estabilidad y de la respuesta dinámica del sistema, así como la selección de una estructura de control adecuada para un proceso hidráulico de variación lenta.

Para el diseño del controlador PI se emplearon técnicas clásicas de control, particularmente el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) y herramientas de análisis en el dominio continuo, como SISO Tool. Estas técnicas permitieron evaluar la influencia de las acciones proporcional e integral sobre la ubicación de los polos del sistema y sobre la respuesta transitoria, sin introducir aún valores definitivos de ganancia.

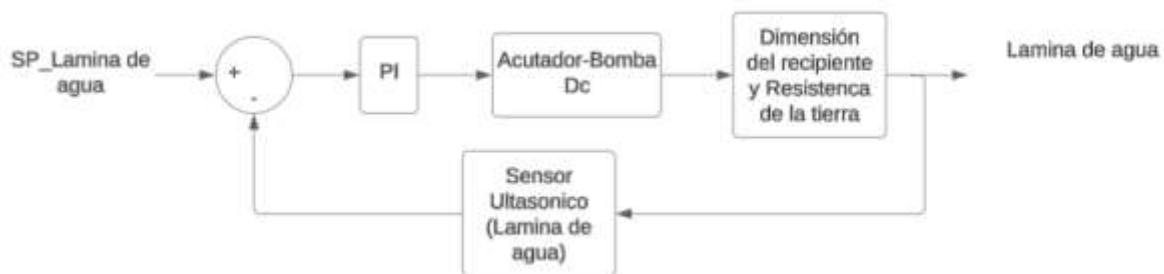


Figura 2.13 Esquema del lazo de control PI para la regulación de la lámina de agua.

Durante el proceso de diseño se establecieron criterios de desempeño orientados a garantizar una respuesta estable y adecuada del sistema de riego. Entre estos criterios se consideraron el tiempo de establecimiento, el sobreimpulso permitido y la eliminación del error en estado estacionario, buscando un compromiso entre rapidez de respuesta y estabilidad del sistema.

La metodología aplicada permitió definir una estructura de control PI coherente con la dinámica del sistema de riego y adecuada para su implementación posterior.

2.10 Especificaciones técnicas

En esta sección se presentan las especificaciones técnicas del prototipo electrónico desarrollado para el análisis del microclima y el control automático del riego. Estas especificaciones describen las capacidades operativas del sistema, los rangos de medición de los sensores, las características del control implementado y las condiciones generales de funcionamiento del prototipo, permitiendo una comprensión clara de sus límites y alcances técnicos.

Tabla 2.3 Especificaciones generales del prototipo de control de riego.

Parámetro	Especificación
Microcontrolador	ESP32
Voltaje de operación	5 V (control) / 12 V (bomba)
Tiempo de muestreo	2.5 minutos
Entorno de operación	Condiciones naturales

Parámetro	Especificación
Tipo de aplicación	Riego en maceta
Comunicación	Serial USB (ESP32-PC)

El sistema de adquisición de datos se basa en un microcontrolador ESP32, el cual opera a un voltaje de 5 V y dispone de entradas analógicas y digitales suficientes para la lectura de sensores ambientales y de humedad del suelo. El tiempo de muestreo del sistema se estableció en intervalos de 2.5 minutos, valor seleccionado en función de la dinámica del microclima y del comportamiento del proceso de infiltración del suelo.

La medición de la temperatura y la humedad relativa del aire se realizó mediante sensores DHT11, los cuales operan dentro de rangos adecuados para aplicaciones agrícolas en condiciones ambientales naturales. La humedad del suelo se midió utilizando sensores capacitivos versión 1.2, seleccionados por su mayor estabilidad y menor susceptibilidad al ruido eléctrico. La señal de radiación solar se obtuvo de manera indirecta a partir de datos meteorológicos oficiales correspondientes a la provincia del Guayas.

Tabla 2.4 Sensores utilizados y rangos de medición.

Variable	Sensor	Rango	Resolución
Temperatura del aire	DHT11	0 – 50 °C	1 °C
Humedad relativa	DHT11	20 – 90 %	1 %
Humedad del suelo	Capacitivo v1.2	Relativo	ADC 12 bits

El sistema de control del riego se implementó mediante un controlador PI, ejecutado de forma discreta en el firmware del ESP32. La señal de control se tradujo en una señal PWM, utilizada para accionar una bomba de agua a través de un módulo de potencia MOSFET. Este enfoque permitió regular el caudal de riego de manera proporcional, asegurando una aplicación controlada del agua al sustrato.

Tabla 2.5 Especificaciones del sistema de control de riego.

Parámetro	Valor
Tipo de controlador	PI
Variable controlada	Lámina de agua
Señal de salida	PWM
Actuador	Bomba de agua
Modelo del proceso	Bomba + Recipiente

El prototipo opera bajo condiciones ambientales naturales y está diseñado para pruebas experimentales en macetas y cultivos a pequeña escala. Las especificaciones técnicas aquí presentadas definen las condiciones bajo las cuales el sistema fue diseñado y validado, sirviendo como referencia para futuras ampliaciones o implementaciones a mayor escala.

Tabla 2.6 Condiciones de operación del prototipo.

Condición	Valor
Tipo de suelo	Agrícola
Presencia de planta	Albahaca
Horario de operación	11:00 – 17:00
Duración de pruebas	20 días

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de la adquisición de datos del microclima

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la medición de las variables de microclima, específicamente la temperatura del aire y la humedad relativa, registradas durante el periodo experimental. Los datos fueron adquiridos mediante sensores DHT11 instalados en una plantación de albahaca, bajo condiciones climáticas naturales y sin control artificial del entorno.

Las mediciones se realizaron durante un periodo de 20 días consecutivos, considerando el intervalo horario comprendido entre las 11:00 y las 17:00 horas, rango en el cual la radiación solar y la demanda evaporativa alcanzan valores elevados. Este enfoque permitió capturar el comportamiento del microclima en escenarios críticos para el cultivo, proporcionando información relevante para el análisis posterior del Déficit de Presión de Vapor.

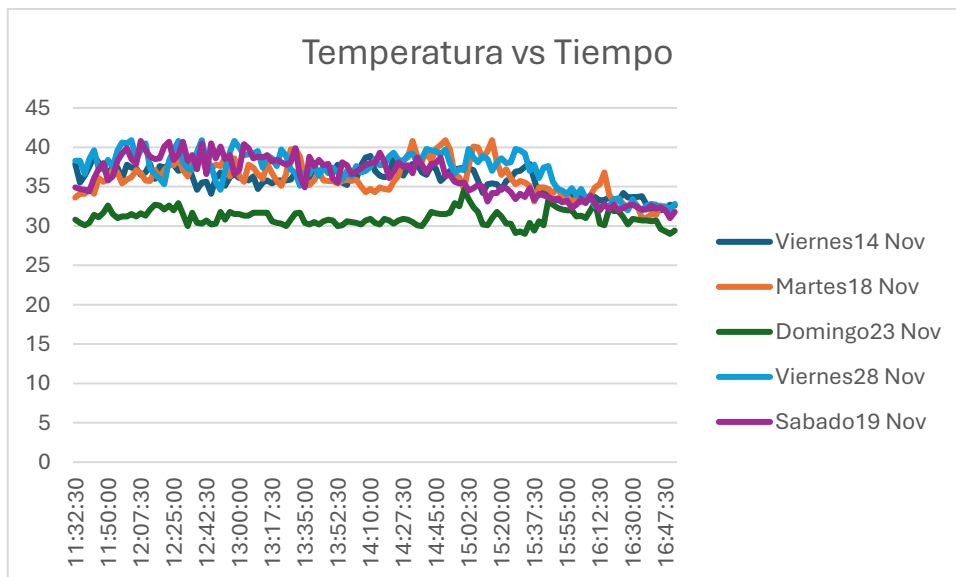


Figura 3.1 Variación de la temperatura del aire registrada durante el periodo experimental.

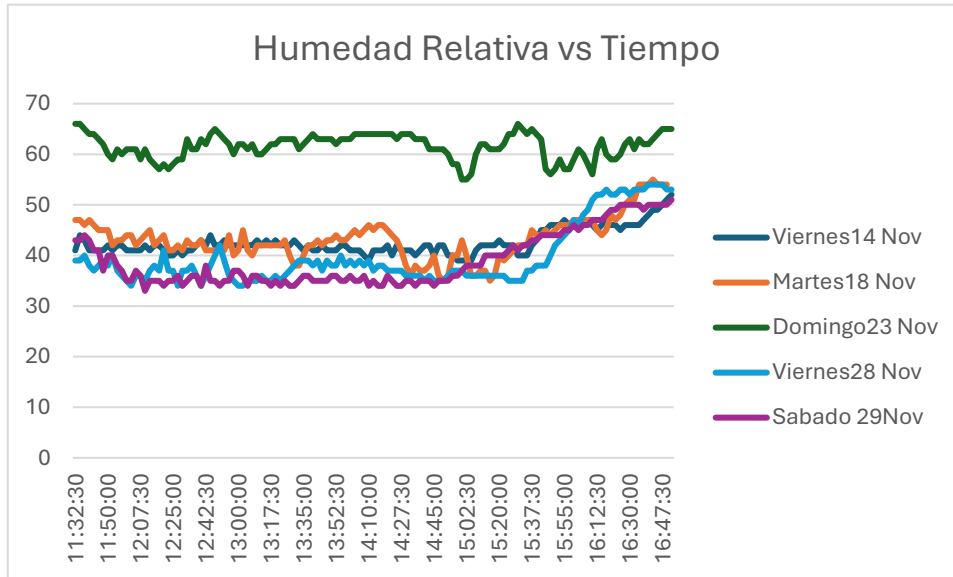


Figura 3.2 Variación de la humedad relativa del aire registrada durante el periodo experimental.

Los resultados obtenidos evidenciaron variaciones diarias en la temperatura del aire, asociadas al ciclo solar y a las condiciones atmosféricas propias del entorno de estudio. De manera similar, la humedad relativa presentó fluctuaciones inversamente proporcionales a la temperatura, comportamiento consistente con la dinámica esperada del microclima agrícola durante las horas de mayor radiación.

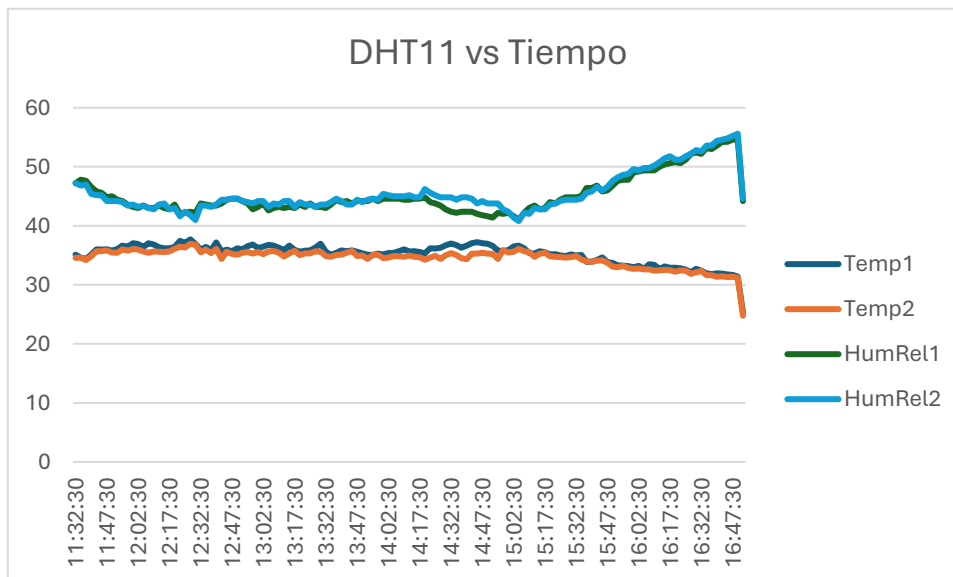


Figura 3.3 Comparación de lecturas de temperatura y humedad relativa obtenidas por los dos sensores DHT11.

Adicionalmente, el uso de dos sensores permitió verificar la coherencia de las mediciones y detectar posibles desviaciones locales en el microclima. En general, los datos registrados mostraron una tendencia estable y reproducible a lo largo de las jornadas experimentales, lo que permitió validar la confiabilidad del sistema de adquisición de datos y su adecuación para el cálculo posterior del Déficit de Presión de Vapor.

En conjunto, los resultados de esta etapa proporcionaron una base sólida para el análisis del comportamiento micro climático del cultivo, constituyendo un insumo fundamental para el cálculo del DPV y la evaluación del impacto del microclima en la gestión del riego, aspectos que se desarrollan en las secciones siguientes.

3.2 Resultados del cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV)

A partir de los datos de temperatura del aire y humedad relativa obtenidos durante el periodo experimental, se procedió al cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV) con el propósito de caracterizar el comportamiento del microclima durante las horas de mayor demanda evaporativa. Para asegurar una representación adecuada de la dinámica real del DPV en el entorno del cultivo, las mediciones se realizaron considerando la altura de instalación del sensor DHT11 respecto a la superficie del suelo, así como la altura promedio de la planta de albahaca, de manera que los datos reflejaran las condiciones micro climáticas del dosel vegetal. Adicionalmente, se incorporó información de radiación solar proveniente de datos meteorológicos oficiales de la provincia del Guayas, específicamente de la ciudad de Guayaquil, como referencia climática externa, debido a que la evolución diaria de la radiación presenta una tendencia similar a la del DPV, siguiendo un comportamiento aproximado de tipo campana, característico de una distribución gaussiana.



Figura 3.4 Relación entre las condiciones experimentales del cultivo, la evolución del Déficit de Presión de Vapor (DPV) y la radiación solar durante el periodo de medición.

Los resultados obtenidos mostraron una variación significativa del DPV a lo largo de las jornadas de medición, con incrementos notorios durante el intervalo horario comprendido entre las 11:00 y las 17:00 horas. Este comportamiento estuvo directamente asociado al aumento de la temperatura del aire y a la disminución de la humedad relativa, condiciones típicas de las horas de mayor radiación solar en el entorno de estudio.

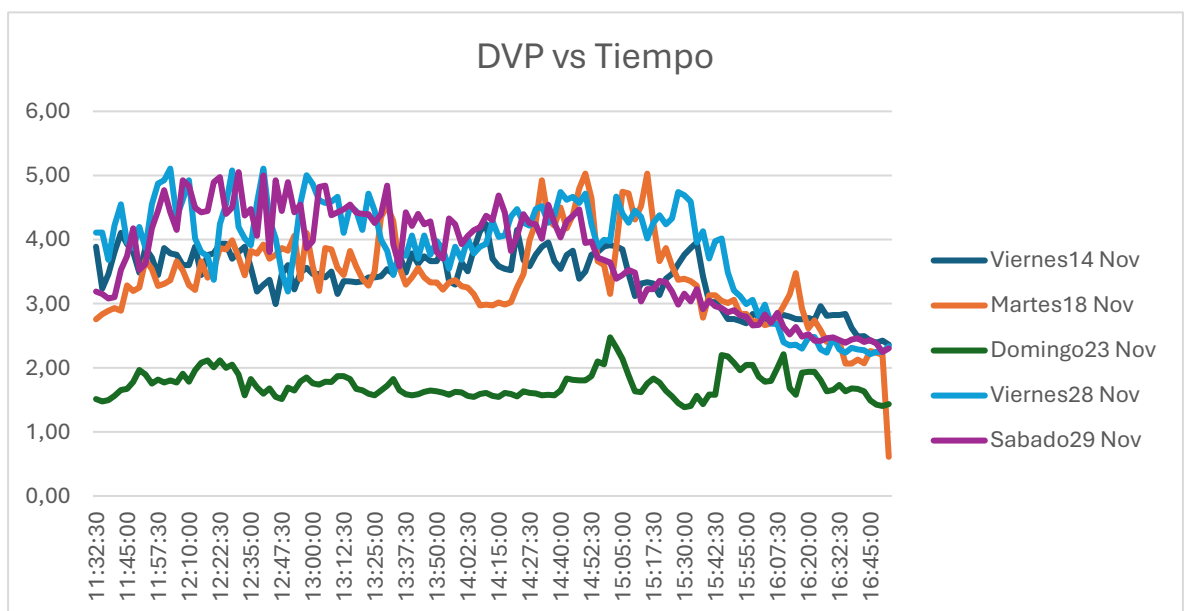


Figura 3.5 Variación diaria del Déficit de Presión de Vapor (DPV) en condiciones climáticas naturales.

Asimismo, el análisis diario del DPV permitió identificar periodos recurrentes en los cuales el déficit alcanzó valores elevados, lo que indica una mayor diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real del aire. Estos escenarios representan condiciones potenciales de estrés hídrico para el cultivo, ya que favorecen una mayor tasa de transpiración y una aceleración en la pérdida de agua del sustrato.

La comparación de los resultados obtenidos a lo largo de los 20 días experimentales evidenció una tendencia consistente en la evolución del DPV, con patrones similares entre jornadas consecutivas bajo condiciones climáticas comparables. Esta consistencia confirmó la coherencia de los datos de microclima registrados y validó el uso del DPV como un indicador adecuado para analizar la influencia del entorno ambiental en la gestión del riego.

En conjunto, los resultados del cálculo del Déficit de Presión de Vapor proporcionaron una base sólida para el análisis posterior del comportamiento hídrico del sistema suelo–cultivo y para la evaluación del impacto del microclima en el diseño del sistema de control del riego, aspectos que se desarrollan en las secciones siguientes.

Tabla 3.1 Valores representativos del Déficit de Presión de Vapor calculado.

Día	DPV MAX	DPV MIN	DPV PROM
Viernes14 Nov	4,24	2,36	3,41
Martes18 Nov	5,03	2,07	3,43
Domingo23 Nov	2,47	1,39	1,74
Viernes28 Nov	5,11	2,21	3,88
Sábado29 Nov	5,05	2,25	3,74

3.3 Resultado de la medición de la humedad del suelo.

Con el objetivo de analizar la dinámica de la humedad del suelo frente a diferentes condiciones de riego y tipos de sustrato, se realizaron múltiples experimentos utilizando sensores de humedad instalados en macetas y recipientes de distintas dimensiones. Las mediciones se efectuaron bajo condiciones ambientales naturales y considerando configuraciones variables de volumen de agua, tipo de suelo y método de aplicación del riego.

En una primera etapa, el viernes 28 de noviembre de 2025, se realizaron pruebas de riego en dos macetas diferentes empleando sensores resistivos FC-28, con una aplicación de 2 litros de agua en una maceta y 0,5 litros en la otra. Los resultados obtenidos, mostrados en la Figura 3.6, evidenciaron que, pese a la diferencia en el volumen de agua aplicado, la señal de humedad del suelo no presentó una dinámica claramente diferenciada en el tiempo, manteniéndose prácticamente constante tras el riego. Este comportamiento se asoció al tipo de suelo utilizado, correspondiente a tierra de sembrío o abono, la cual presentó una rápida saturación y escasa variación medible por los sensores.



Figura 3.6 Evolución temporal de la humedad del suelo medida con sensores FC-28 en dos macetas con diferente volumen de riego.

Posteriormente, el domingo 14 de diciembre, se repitieron los experimentos utilizando sensores capacitivos de humedad de suelo versión 1.2, con el fin de reducir el ruido presente en las mediciones anteriores. En esta configuración se observaron ligeras variaciones temporales en la señal de humedad, como se muestra en la Figura 3.7; sin embargo, la dinámica obtenida no fue la esperada

para fines de modelado y control, ya que la respuesta del suelo seguía siendo limitada.

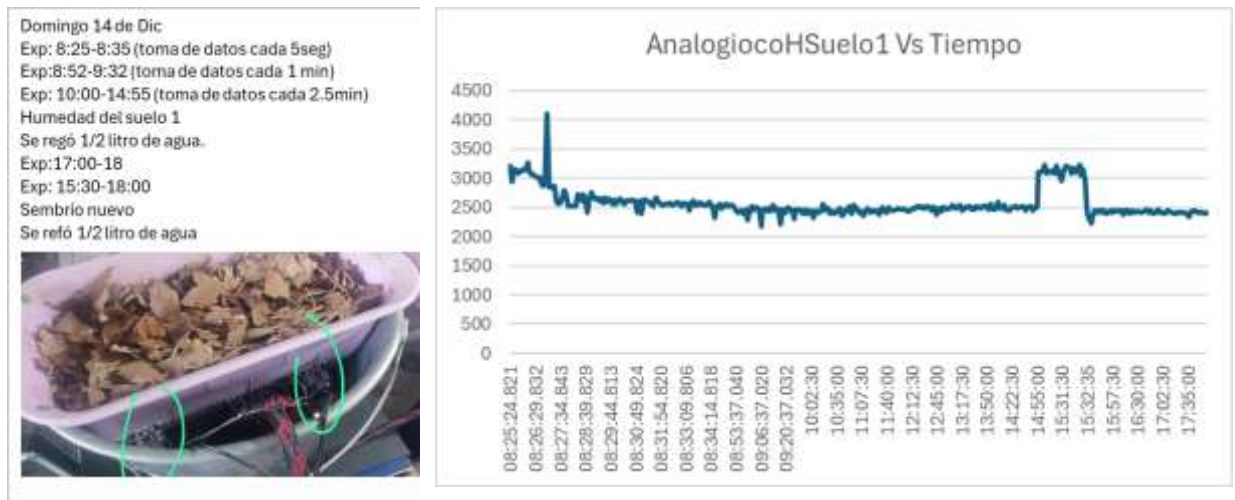


Figura 3.7 Respuesta de la humedad del suelo utilizando sensores capacitivos v1.2 en maceta con tierra de sembrío.

A partir de estos resultados, se formuló la hipótesis de que la ausencia de una dinámica clara no dependía únicamente del sensor, sino también de la geometría del recipiente que contenía el sustrato. Para validar esta hipótesis, se realizó un nuevo experimento utilizando un balde de mayor profundidad, manteniendo el mismo tipo de suelo de sembrío, e instalando sensores de humedad a diferentes alturas (superior, intermedia e inferior). Los resultados obtenidos, presentados en la Figura 3.8, mostraron una mayor variabilidad espacial en la humedad; no obstante, la respuesta temporal continuó siendo rápida y poco representativa de un proceso de infiltración gradual.

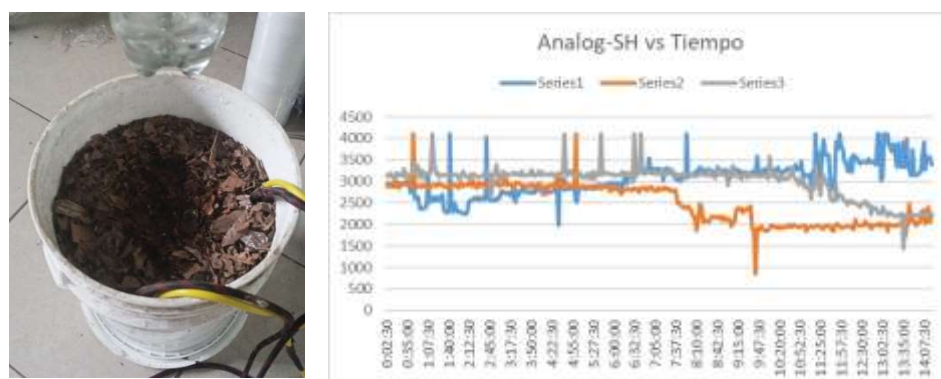


Figura 3.8 Distribución de la humedad del suelo en balde de mayor profundidad con sensores ubicados a distintas alturas.

En una etapa posterior, se modificó el tipo de suelo, empleando tierra arcillosa compactada, representativa de los suelos utilizados en cultivos de la zona costera de la provincia del Guayas. Bajo estas condiciones, se observó una respuesta más coherente entre la aplicación del riego y la variación de la humedad del suelo, como se evidencia en la Figura 3.9. Sin embargo, la humedad tendía a estabilizarse rápidamente, lo que condujo a una nueva hipótesis relacionada con el método de aplicación del riego.

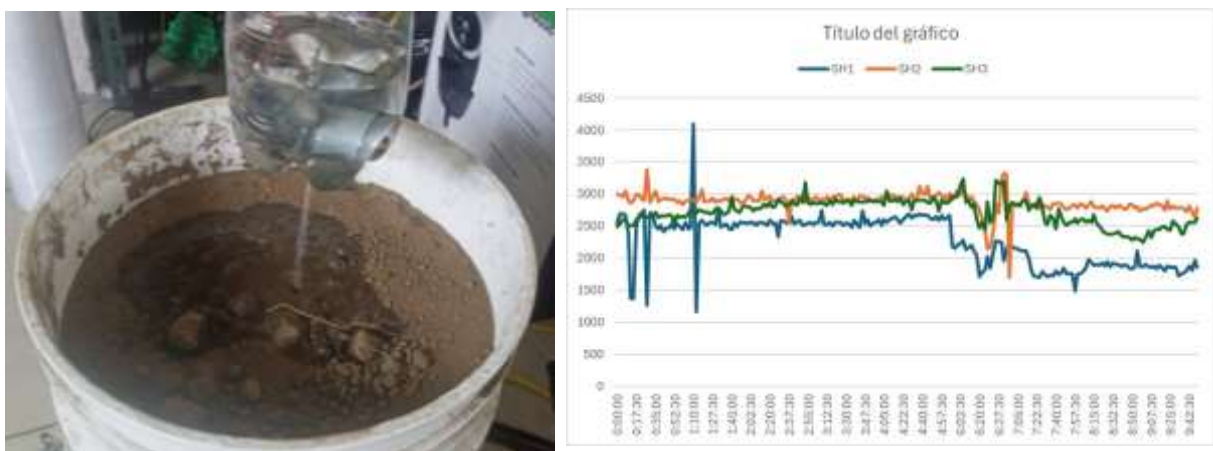


Figura 3.9 Dinámica de la humedad del suelo en tierra arcillosa compactada bajo riego puntual.

Para evaluar esta hipótesis, se comparó un riego puntual y rápido con un riego gradual por goteo, manteniendo un volumen total de agua aproximado de 500 ml aplicado durante una hora. El riego por goteo radial se implementó mediante un sistema de venocllisis, permitiendo controlar el caudal de forma precisa. Los resultados obtenidos, mostrados en la Figura 3.10, evidenciaron una dinámica de humedad más gradual y estable, adecuada para el análisis del proceso de infiltración y para la posterior implementación del sistema de control.

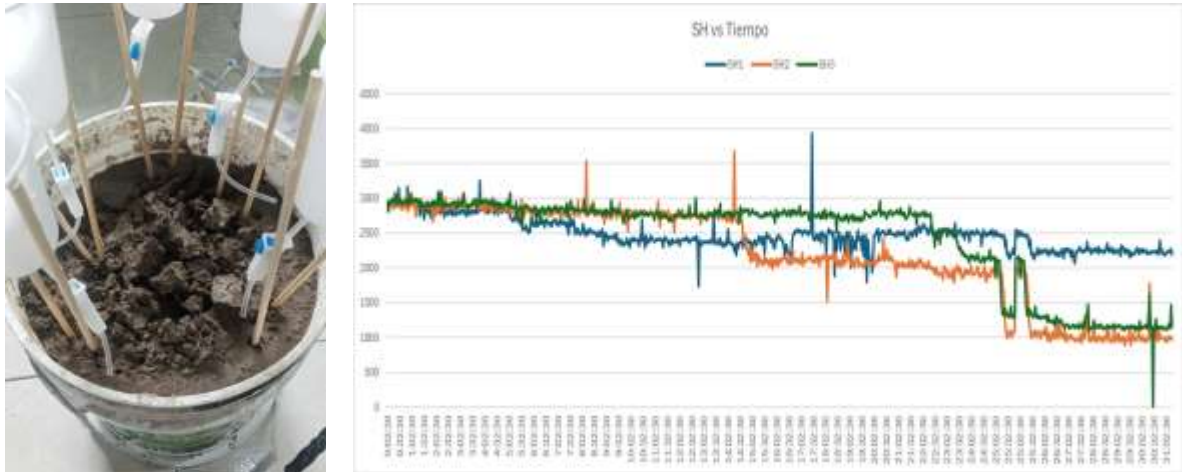


Figura 3.10 Evolución de la humedad del suelo bajo riego radial por goteo controlado mediante sistema de venoclisis.

En conjunto, estos resultados permitieron identificar que la dinámica de la humedad del suelo depende de manera significativa del tipo de sustrato, la geometría del recipiente y el método de aplicación del riego, siendo estos factores determinantes para el diseño y validación del sistema de control de riego propuesto.

3.4 Identificación del modelo matemático del sistema lámina de agua-riego.

La identificación de la planta se realizó a partir de datos experimentales obtenidos durante los ensayos de riego, con el objetivo de construir un modelo matemático que represente la relación entre la señal aplicada a la bomba peristáltica y la variación temporal de la lámina de agua en el sistema. El proceso de identificación consideró de manera integrada la dinámica de la bomba, las características geométricas del recipiente y el comportamiento hidráulico del suelo.

3.4.1 Identificación experimental de la bomba peristáltica

Para caracterizar el comportamiento de la bomba peristáltica, se realizaron ensayos aplicando distintos valores de señal PWM y registrando el volumen de agua suministrado en función del tiempo. A partir de estas mediciones se calculó el caudal generado por la bomba bajo condiciones controladas.

Inicialmente se evaluó el comportamiento de la bomba para diferentes porcentajes de PWM, determinando el volumen entregado y el tiempo requerido para alcanzar dicho volumen. Posteriormente, se realizaron

múltiples ensayos a un valor fijo de PWM (80 %) con el fin de analizar la repetibilidad del caudal generado.

Tabla 3.2 Medición de caudal de la bomba para distintos niveles de PWM

Duty	Voltaje (sin carga)	Voltaje(carga)
100	10,56	10,3
95	9,44	9,18
90	8,46	8,02
85	8,06	6,87
80	7,64	5,8
75	7,17	5,36
70	6,67	4,88
65	6,12	4,4
60	5,5	3,9
55	4,8	3,13
50	4	2,81
45		2,12

Duty (%)	ml	L	min	Seg.	ml/s	ml/min	L/min
50	625	0,625	2,39	143,4	4,35843794	261,506276	0,26150628
100	625	0,625	0,4167	25	25	1499,88001	1,49988001

3.4.2 Estimación de parámetros dinámicos K_1 , τ_1 y L

A partir de los ensayos realizados con la bomba operando al 80 % de PWM, se analizaron las respuestas temporales del caudal para estimar los parámetros dinámicos del sistema. El retardo L se determinó como el tiempo transcurrido desde la activación de la bomba hasta el inicio efectivo del flujo de agua.

La constante de tiempo τ_1 se estimó a partir del tiempo requerido para que el caudal alcanzara un régimen estable, mientras que la ganancia estática K_1 se obtuvo a partir del caudal promedio medido bajo condiciones estacionarias.

Tabla 3.3 Tiempo de retardo para llegar desde reservorio de agua al recipiente.

TIEMPO DE RETARDO (L)			
ensayo	Duty	tiempo	
	1	80	2,58
	2	80	2,21
	3	80	1,02
	4	80	2,21
	5	80	1,21
			1,846

Tabla 3.4 Caudal al 80%

Caudal (ml/s)			
Duty	volumen(ml)	tiempo(s)	caudal(ml/s)
80	625	36,55	17,10
80	625	38,3	16,32
		37,425	16,70

Tabla 3.5 Tiempo de estabilización del caudal al 80%

Tiempo de estabilización (s)				
	volumen	tiempo	Caudal	
1	80	0,17	10	0,0160
2	80	0,344	20	0,0172
3	80	0,464	30	0,0155
4	80	0,615	40	0,0154
5	80	0,772	50	0,0154

Tabla 3.6 Estimación de parámetros dinámicos de la bomba

L (retardo) s	1,85
Caudal (ml/s) 80%	16,70
kq_m	20,875
t_estab	30
tao	10

3.4.3 Caracterización geométrica del recipiente

El recipiente utilizado para el almacenamiento del agua fue caracterizado geoméricamente con el fin de determinar su área transversal efectiva A , necesaria para relacionar el caudal con la variación de la lámina de agua. El recipiente presentó una geometría cilíndrica, por lo que el área transversal se calculó a partir del radio medido experimentalmente.

Tabla 3.7 Dimensiones geométricas del recipiente

radio del recipiente (cm)	14cm
Area transversal (m ²)	0.0573

3.4.4 Identificación del suelo como resistencia hidráulica.

El suelo fue modelado como una resistencia hidráulica equivalente, la cual limita el caudal de salida del sistema. Para su identificación se realizaron ensayos de riego controlado, registrando el volumen de agua aplicado, el tiempo de inicio del drenaje y la variación de la lámina de agua.

Adicionalmente, se realizaron mediciones del peso y la humedad inicial del suelo en diferentes recipientes, con el fin de analizar la influencia del estado hídrico del suelo sobre el drenaje y la formación de la lámina de agua.

Tabla 3.8 Condiciones iniciales del suelo para los ensayos hidráulicos

	Peso G	HumedadInicial	Normalizado	Hora
Recipiente 1	200	2200	0,176	10:50
Recipiente 2	238	2136	0,213	10:50
Recipiente 3	239	1980	0,302	10:50

	Peso G	HumedadInicial	Normalizado	Hora
Recipiente 1	191	2559	0	12:50
Recipiente 2	228	2533	0	12:50
Recipiente 3	229	2590	0	12:50

Tabla 3.9 Ensayos de drenaje y formación de lámina de agua en el suelo

	ml entrada	tiempo comienzo(hora)	tiempo de primera gota(hora)	tiempo de la última gota(hora)	ml salida	tiempo(min)	lamina
nivel2	160	14:35	14:45	15:21	36	11:30	0,7cm
nivel3	200	14:34	14:48	15:13	22	15:04	0,6cm

3.4.5 Modelo matemático global de la planta.

A partir de la identificación experimental de la bomba, la caracterización geométrica del recipiente y la modelación del suelo como una resistencia hidráulica, se obtuvo un modelo matemático que describe la dinámica del sistema de riego. El modelo relaciona la señal de control aplicada a la bomba con la evolución temporal de la lámina de agua.

La dinámica de la bomba fue representada mediante un modelo de primer orden con retardo, mientras que la relación entre el caudal y la lámina de agua se estableció a partir del balance de masa en el recipiente. El suelo fue incorporado al modelo como un término de salida proporcional al nivel de agua.

La función de transferencia final de la planta se presenta en la ecuación correspondiente y constituye la base para el diseño y análisis del controlador PI, desarrollado en la sección siguiente.

3.5 Diseño y simulación del controlador PI.

3.5.1 Objetivo del diseño del controlador

El diseño del controlador PI tuvo como objetivo garantizar una regulación estable y robusta de la lámina de agua en el sistema de riego, minimizando el error en estado estacionario y evitando oscilaciones excesivas que pudieran afectar el comportamiento hidráulico del suelo. El controlador fue

diseñado considerando la dinámica lenta del sistema y las restricciones físicas propias del proceso de riego.

3.5.2 Modelo dinámico de la planta para el diseño del control.

A partir de la identificación experimental presentada en la sección 3.3, la planta fue modelada como un sistema continuo que integra la dinámica de la bomba peristáltica, el recipiente y la resistencia hidráulica del suelo. El modelo obtenido corresponde a una función de transferencia de segundo orden, cuya expresión general se presenta en la ecuación correspondiente.

Este modelo fue implementado en MATLAB y Simulink, permitiendo su análisis mediante técnicas clásicas de control en el dominio de Laplace.

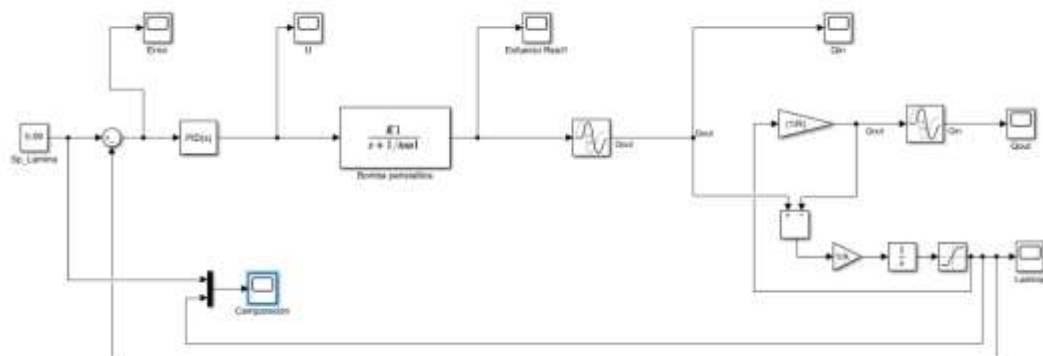


Figura 3.11 Modelo dinámico del sistema de riego implementado en Simulink

3.5.3 Análisis del sistema mediante el lugar geométrico de las raíces

El análisis inicial del sistema se realizó mediante el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR), con el fin de evaluar la estabilidad del sistema en lazo cerrado y la evolución de los polos dominantes en función de la ganancia del controlador. Esta técnica permitió identificar regiones de operación estables y observar el efecto de la ganancia sobre el amortiguamiento del sistema.

El LGR mostró que el sistema presenta polos dominantes complejos conjugados, lo cual es característico de procesos hidráulicos con

almacenamiento y resistencia, y permite anticipar una respuesta amortiguada cuando se seleccionan adecuadamente los parámetros del controlador.

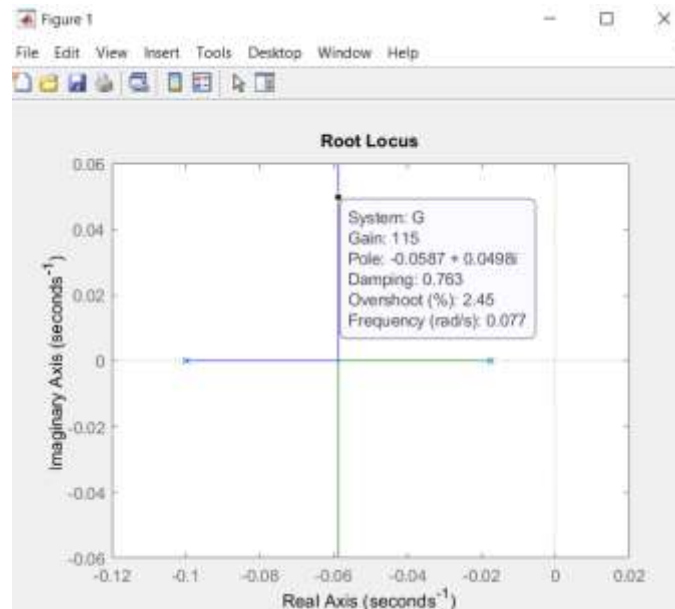


Figura 3.12 Lugar geométrico de las raíces del sistema de riego

3.5.4 Selección de polos dominantes y criterios de desempeño

A partir del análisis del LGR, se seleccionaron polos dominantes que cumplen criterios de desempeño previamente establecidos. Entre los parámetros considerados se incluyeron el coeficiente de amortiguamiento (ζ), el porcentaje de sobreimpulso y el tiempo de establecimiento, buscando una respuesta suave y estable compatible con la dinámica del sistema de riego.

Los polos seleccionados presentaron un amortiguamiento adecuado, con un sobreimpulso reducido y una frecuencia natural baja, lo cual es deseable en aplicaciones agrícolas donde no se requieren respuestas rápidas, sino control progresivo y estable.

3.5.5 Ajuste del controlador PI mediante SISO Tool

El ajuste fino del controlador PI se realizó utilizando la herramienta SISO Tool de MATLAB, lo que permitió modificar de forma interactiva las ganancias proporcional e integral. Esta herramienta facilitó la evaluación simultánea del comportamiento en el dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia.

El controlador resultante permitió desplazar los polos del sistema a ubicaciones que garantizan estabilidad, buen amortiguamiento y reducción del error estacionario, cumpliendo con los criterios de desempeño definidos para el sistema de riego.

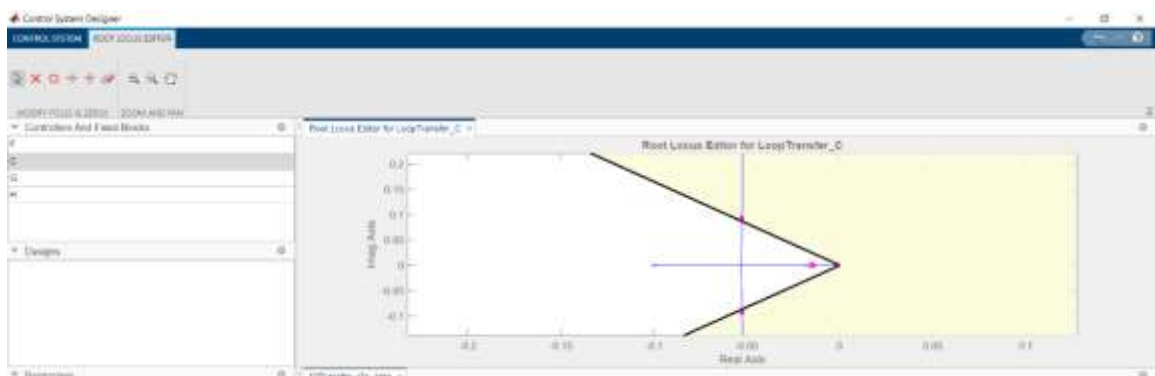


Figura 3.13 Editor del lugar geométrico de las raíces en SISO Tool

3.5.6 Análisis de la respuesta temporal del sistema controlado.

Una vez ajustado el controlador PI, se evaluó el comportamiento dinámico del sistema mediante la simulación de la respuesta al escalón de la referencia de lámina de agua. Esta simulación permitió analizar el tiempo de subida, el sobreimpulso y el error en estado estacionario.

La respuesta obtenida mostró un comportamiento estable, con un sobreimpulso reducido y una convergencia progresiva hacia la referencia, lo que confirma la adecuación del controlador PI para la regulación de la lámina de agua en el sistema propuesto.

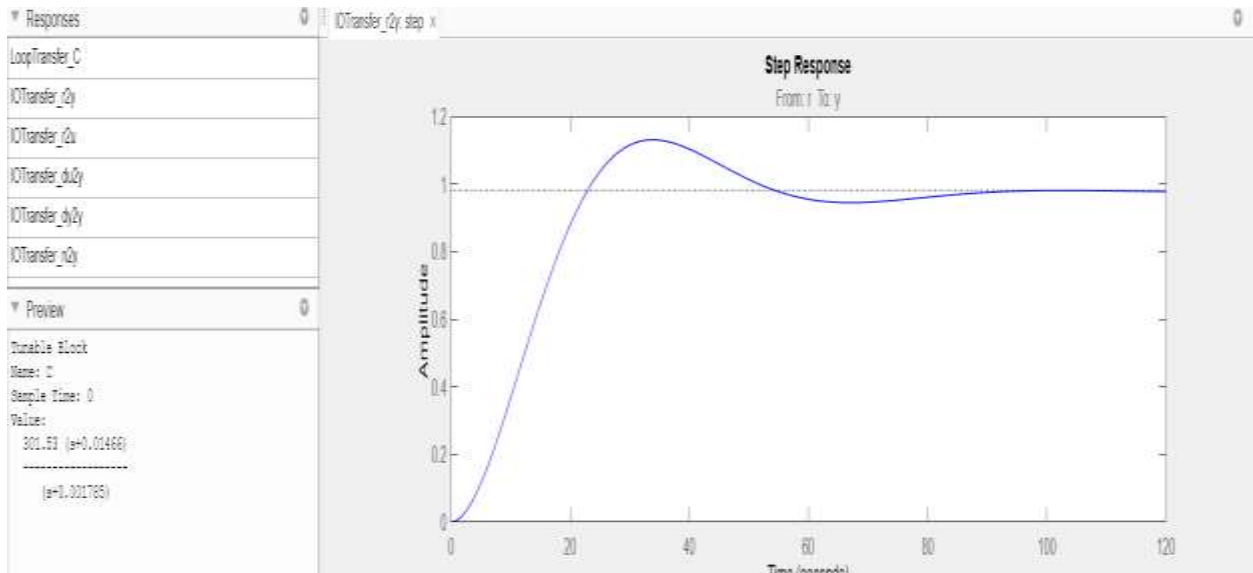


Figura 3.14 Respuesta al escalón del sistema de riego con controlador PI

3.5.7 Discusión de resultados

El análisis realizado evidenció que el controlador PI diseñado permite regular la lámina de agua de forma estable y confiable, compensando las dinámicas lentas del sistema hidráulico y las perturbaciones asociadas al suelo. La acción proporcional contribuyó a mejorar la rapidez de respuesta, mientras que la acción integral permitió eliminar el error en estado estacionario.

Estos resultados validan el uso de un controlador PI continuo como una solución adecuada para el control automático del riego, alineándose con los objetivos del proyecto y con las necesidades reales de sistemas agrícolas.

3.6 Validación experimental

Posteriormente, el controlador PI fue puesto a prueba en un entorno experimental de laboratorio con el fin de analizar su desempeño bajo condiciones reales. En esta etapa inicial, se emplearon sensores resistivos FC-28 para la medición de la humedad del suelo, combinando dos sensores como una única señal promedio con el objetivo de reducir el ruido y mejorar la representatividad de la medición.

La Figura 3.16 presenta los resultados experimentales obtenidos con esta configuración. Si bien se observó una respuesta dinámica coherente entre la acción de control y la evolución de la humedad, los datos mostraron una alta variabilidad y ruido, especialmente durante eventos de riego prolongados. Este comportamiento se atribuyó a las características físicas del suelo arcilloso, el cual, al saturarse, adquiere una consistencia lodosa que altera significativamente la conductividad eléctrica medida por los sensores FC-28.

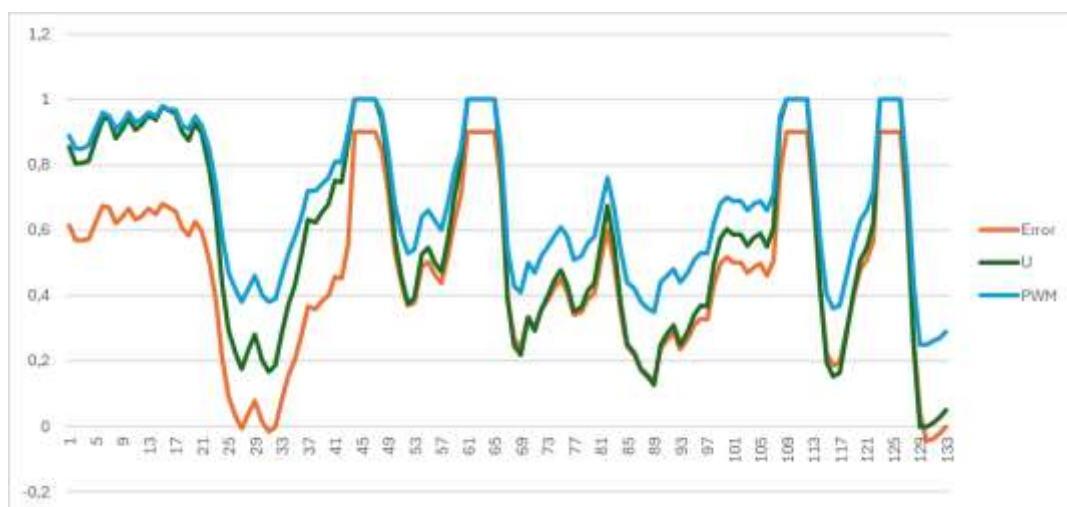


Figura 3.15 Respuesta experimental del controlador PI utilizando sensores FC-28

Debido a esta limitación, se realizaron pruebas adicionales basadas en principios hidrodinámicos, específicamente un experimento inspirado en la ecuación de Bernoulli, donde se evaluó la posibilidad de medir directamente la lámina de agua en lugar de la humedad interna del suelo.

Medición de la lámina de agua y cambio de estrategia de sensado

Como resultado de los análisis experimentales, se incorporó un sensor ultrasónico para la medición directa del nivel de agua. Este sensor permitió capturar de manera más precisa y repetible la dinámica rápida de la lámina de agua, evitando los problemas asociados a la variabilidad eléctrica del suelo húmedo.

La Figura 3.17 muestra la respuesta del sistema utilizando el sensor ultrasónico, donde se aprecia una relación clara entre la acción del controlador PI y la variación del nivel de agua. En esta configuración, fue posible establecer una referencia de 2 cm de lámina de agua, la cual fue regulada eficazmente mediante la modulación del caudal de la bomba.

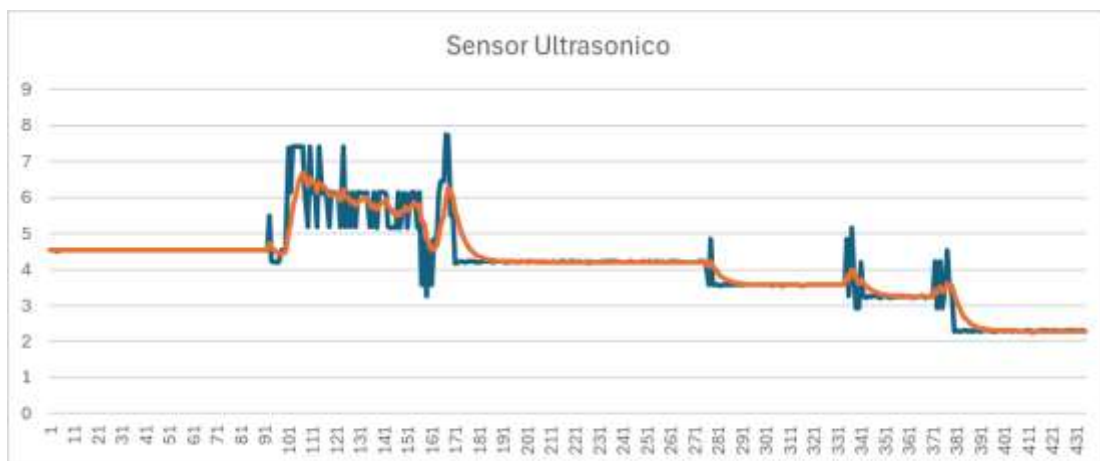


Figura 3.16 Dinámica de la lámina de agua medida mediante sensor ultrasónico

No obstante, durante las primeras pruebas se detectaron errores asociados a la variación del color y turbidez del agua, producto del filtrado del suelo. Estos cambios afectaban la medición ultrasónica, lo que motivó el desarrollo de un dispositivo mecánico con boya, el cual permitió aislar la medición del nivel de agua de las variaciones sonoras por la textura del fluido.

Ajuste final del controlador PI para dinámica rápida

Dado que la dinámica de la lámina de agua es considerablemente más rápida que la dinámica de la humedad del suelo, se realizó un reajuste experimental de los parámetros del controlador PI. A partir de pruebas de laboratorio, se determinaron los valores $k_p=1.4$ y $k_i=0.005$, los cuales permitieron obtener una respuesta más ágil sin comprometer la estabilidad del sistema.

Las gráficas presentadas en la Figura 3.18 muestran la evolución del error, la señal de control y la salida del sistema, confirmando que el controlador respondió de manera adecuada ante variaciones rápidas de la lámina de agua, manteniendo el nivel dentro del rango deseado.

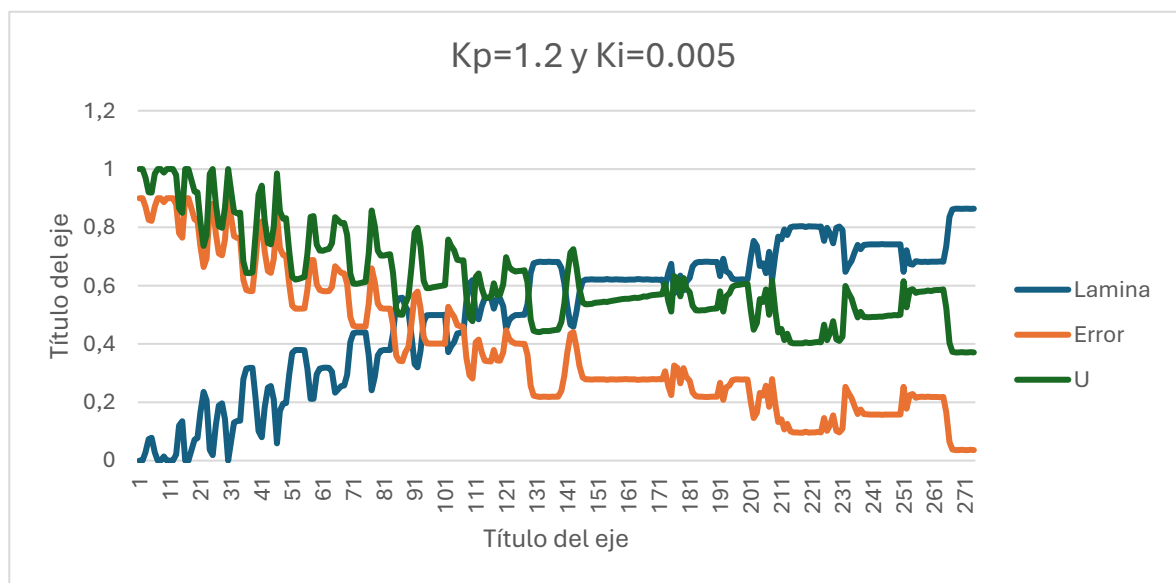


Figura 3.17 Cambios de parámetros del controlador

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el controlador PI diseñado fue capaz de regular eficazmente tanto la humedad del suelo como la lámina de agua, adaptándose a las diferentes dinámicas del sistema y validando su aplicación en sistemas de riego automatizado orientados a la mitigación del DPV.

3.7 Resultados del sistema de control de riego

Una vez implementado el controlador PI y validado su comportamiento en simulación y pruebas preliminares, se procedió a evaluar el desempeño del sistema de control de riego bajo condiciones experimentales reales, integrando el dispositivo de medición de lámina de agua, el sensor ultrasónico, la bomba de riego y el recipiente de cultivo con la planta de albahaca.

Para esta etapa, la variable controlada correspondió a la lámina de agua presente en el recipiente, medida indirectamente a través de la distancia detectada por el sensor ultrasónico. A partir de esta medición, y considerando el principio de Bernoulli aplicado al sistema hidráulico, la señal fue convertida a unidades de altura de lámina en centímetros, permitiendo trabajar con referencias comprendidas entre valores del orden de 0.3 mm hasta 2 cm.

Con el fin de facilitar el análisis y la implementación del controlador, tanto la señal de medición de la lámina de agua como la señal de salida de la bomba fueron normalizadas en un rango adimensional de 0 a 1. De igual manera, la fuerza de control generada por el controlador PI fue expresada en el mismo rango, garantizando coherencia entre las variables internas del sistema.

La Figura 3.19 muestra la evolución temporal de la lámina de agua, el error de control y la señal PWM aplicada a la bomba para un setpoint definido. En esta figura se observa que, al inicio del experimento, el error presentó valores elevados debido a la ausencia de agua en el recipiente. Como consecuencia, el controlador generó una acción de control significativa, incrementando el ciclo de trabajo del PWM y, por ende, el caudal de riego suministrado.

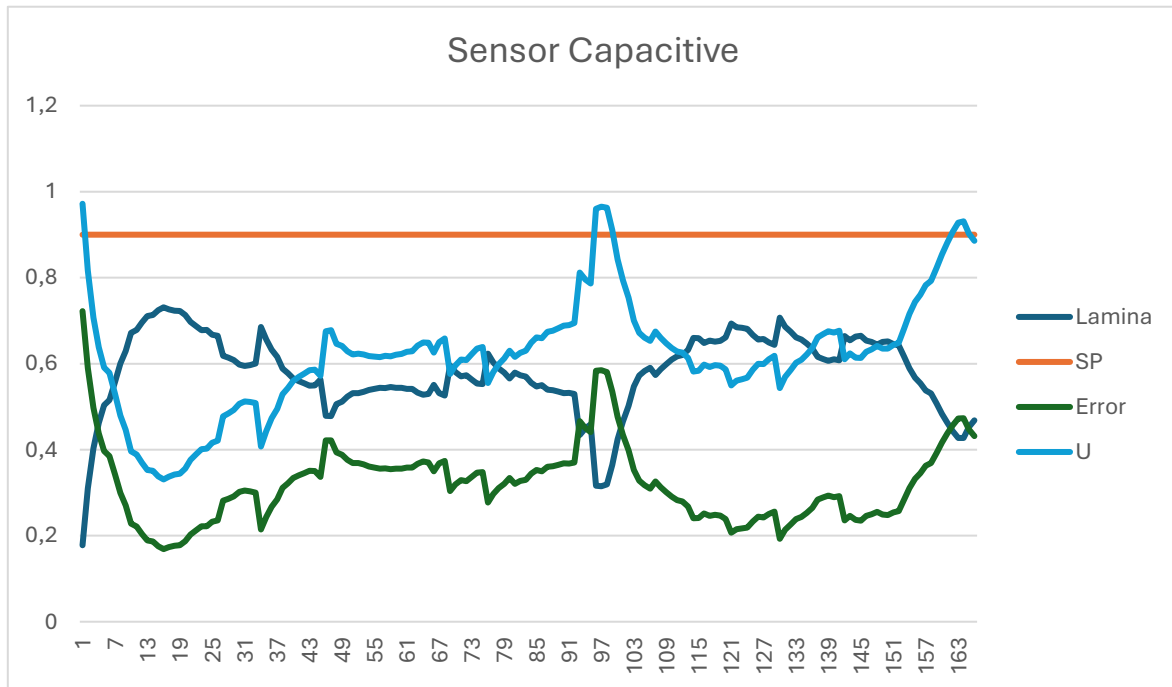


Figura 3.18 Dinámica del control del riego con el sensor CapacitiveV1.2

A medida que la lámina de agua se aproximó al valor de referencia, el error disminuyó progresivamente y la señal de control se ajustó de manera proporcional, reduciendo el caudal de la bomba hasta estabilizar el sistema en torno al setpoint establecido. Este comportamiento confirma que el controlador PI logró regular la dinámica del sistema sin generar oscilaciones bruscas ni sobreimpulsos significativos.

Adicionalmente, se analizó el tiempo requerido para alcanzar el setpoint de lámina de agua bajo diferentes condiciones experimentales. Los resultados evidenciaron que el tiempo de establecimiento dependió directamente de las dimensiones geométricas del recipiente, particularmente de su área transversal, así como del caudal máximo disponible de la bomba. En recipientes de mayor sección transversal, se observó un mayor tiempo de llenado para un mismo valor de referencia, lo cual es consistente con el balance volumétrico del sistema.

Estos resultados permitieron concluir que el sistema de control de riego fue capaz de regular eficazmente la lámina de agua en tiempo real, adaptando la fuerza de control y el caudal suministrado en función del error, y validando la estrategia de control PI aplicada a una dinámica rápida asociada al nivel de agua.

En conjunto, el comportamiento observado confirma que la integración del sensor ultrasónico, el modelo hidráulico basado en Bernoulli y el controlador PI permitió obtener un sistema estable, repetible y adecuado para su aplicación en riego automatizado orientado a la mitigación del estrés hídrico en cultivos.

3.8 Análisis integral del sistema

Con el objetivo de evaluar el desempeño global del prototipo desarrollado, se llevó a cabo un experimento final en el cual se integraron de manera simultánea el sistema de control de humedad del suelo, el control de lámina de agua y la estrategia de mitigación del Déficit de Presión de Vapor (DPV). Esta prueba permitió analizar el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones de operación reales y validar la interacción entre sus diferentes subsistemas.

Durante el experimento, se instalaron tres sensores de humedad del suelo distribuidos verticalmente a intervalos de 10 cm, con el fin de representar diferentes zonas del perfil radicular. Cada sensor fue asociado a un setpoint específico de humedad, definido en función de las condiciones óptimas del cultivo. A medida que la humedad medida por cada sensor alcanzó su valor de referencia, el sistema redujo progresivamente el caudal de riego en un 20%, aplicando una lógica escalonada de control.

Este esquema permitió que, al alcanzarse el setpoint del primer sensor, la bomba disminuyera su señal PWM en un 20% del valor inicial. Posteriormente, al cumplirse el setpoint del segundo sensor, se aplicó una reducción adicional del 20%, y finalmente, al alcanzarse el setpoint del tercer sensor, el proceso de riego se dio por concluido y la bomba fue desactivada. Esta estrategia evitó la sobre aplicación de agua y favoreció una redistribución gradual de la humedad en el suelo.

De manera paralela, se mantuvo activo el control PI de la lámina de agua, cuya función consistió en regular el nivel de agua presente en el recipiente. El setpoint de la lámina de agua fue ajustable y permitió compensar las variaciones de demanda hídrica asociadas al DPV. A medida que la lámina se aproximó al valor de referencia, el controlador PI redujo progresivamente la fuerza de control, disminuyendo el caudal suministrado y estabilizando el sistema sin generar oscilaciones abruptas.

La Figura 3.20 muestra la evolución temporal de la humedad del suelo en las tres profundidades consideradas, junto con la señal de control aplicada a la bomba. En esta figura se evidencia claramente la reducción escalonada del caudal conforme se alcanzaron los setpoints de cada sensor, así como la estabilización de la humedad en el perfil del suelo.

Por otro lado, la Figura 3.21 presenta la dinámica conjunta de la lámina de agua, el error de control y la fuerza de control generada por el controlador PI. Se observa que el error disminuyó progresivamente a medida que la lámina alcanzó su referencia, mientras que la señal PWM se ajustó de forma continua, confirmando la acción reguladora del controlador.

El análisis de estos resultados permitió concluir que la dinámica del sistema estuvo influenciada tanto por la respuesta rápida de la lámina de agua como por la respuesta más lenta del suelo. Esta diferencia de escalas temporales fue gestionada de manera efectiva mediante la combinación del control PI de la lámina y la lógica escalonada basada en sensores de humedad, logrando un balance adecuado entre rapidez de respuesta y estabilidad.

En conjunto, el experimento final demostró que el sistema fue capaz de regular el riego de forma automática, adaptativa y progresiva, mitigando condiciones de estrés hídrico asociadas a altos valores de DPV y evitando la saturación del suelo. Estos resultados validan la propuesta desarrollada y confirman la viabilidad del

prototipo como una solución funcional para el control de riego basado en microclima.

3.9 Análisis de costos

El análisis de costos del prototipo desarrollado se realizó con el objetivo de evaluar la viabilidad económica de la solución propuesta y su posible aplicación en sistemas de riego a pequeña y mediana escala. Para ello, se consideraron únicamente los costos asociados a los componentes electrónicos, sensores, actuadores hidráulicos y materiales auxiliares empleados en la construcción del sistema, excluyendo costos de mano de obra, software académico y equipamiento de laboratorio. Los resultados evidencian que el prototipo presenta un costo reducido en comparación con sistemas comerciales de riego tecnificado, lo cual se debe principalmente al uso de sensores de bajo costo, un microcontrolador de propósito general y elementos hidráulicos de fácil adquisición. Esta característica convierte al sistema en una alternativa económicamente viable para procesos de tecnificación agrícola orientados a la mitigación del estrés hídrico mediante el control automático del riego.

Tabla 3.10 Costos de los componentes del prototipo de control de riego

Ítem	Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
1	Microcontrolador ESP32	1	12,00	12,00
2	Sensor DHT11 (Temp. y HR)	2	4,00	8,00
3	Sensor de humedad FC-28	4	2,50	10,00
4	Sensor capacitivo de humedad v1.2	4	4,00	16,00

Ítem	Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
5	Sensor Ultrasonico HC-SR04	1	3.50	3.50
6	Módulo MOSFET IRF520	1	3,00	3,00
7	Bomba de diafragma 12 V	1	5,00	5,00
8	Fuente de alimentación 3.3v, 5v y 12 V	1	12,00	12,00
9	Cables apantallados (HDMI / señal)	1	5,00	5,00
10	Protoboard y jumpers	1	4,00	4,00
11	Recipientes (macetas, balde)	2	5,00	5,00
12	Sistema de riego por goteo (venoclisis)	1	3,00	5,00
13	Mangueras y conectores hidráulicos	1	5,00	5,00
14	Materiales varios (tierra, soporte, fijación)	1	10,50	6,50
Total estimado del prototipo				96,50 USD

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se desarrolló exitosamente un prototipo electrónico funcional para el análisis del microclima y el control automático del riego, capaz de integrar la medición de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y lámina de agua. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema permitió caracterizar adecuadamente las condiciones microclimáticas que influyen en el Déficit de Presión de Vapor (DPV), cumpliendo con el objetivo general del proyecto.
- El análisis experimental del microclima evidenció que el DPV presenta una dinámica diaria bien definida, estrechamente relacionada con la radiación solar y la posición del sensor respecto a la planta y al suelo. Se observó que los valores máximos de DPV se concentraron durante las horas de mayor irradiancia, confirmando su papel como un indicador crítico del estrés hídrico potencial en el cultivo de albahaca.
- Los ensayos realizados con sensores de humedad del suelo permitieron concluir que el tipo de suelo y el método de riego influyen de manera determinante en la dinámica de la humedad. En suelos orgánicos o de abono, la respuesta fue altamente amortiguada, mientras que en suelos arcillosos compactados se obtuvo una dinámica más definida, aunque con tiempos de estabilización cortos. Estos resultados justificaron la selección de condiciones experimentales controladas para el modelado del sistema suelo–riego.
- La identificación del modelo matemático del sistema suelo–riego, a partir de datos experimentales reales, permitió representar adecuadamente la relación entre el caudal aplicado y la respuesta de la humedad del suelo. El modelo continuo obtenido capturó la naturaleza lenta, acumulativa y con retardo del proceso de infiltración, lo cual constituyó una base sólida para el diseño del controlador PI.

- El diseño y simulación del controlador PI discreto demostraron que es posible regular tanto la humedad del suelo como la lámina de agua de forma estable y controlada. Los parámetros del controlador fueron ajustados mediante herramientas de simulación y criterios basados en literatura especializada, obteniéndose una respuesta sin oscilaciones excesivas y con error estacionario reducido.
- Los resultados del control de lámina de agua mediante sensor ultrasónico, apoyado en el principio de Bernoulli, evidenciaron una dinámica rápida y medible, superior a la obtenida con sensores resistivos de humedad en condiciones de suelo lodoso. Este enfoque permitió definir referencias de lámina en el rango de milímetros a centímetros, facilitando una regulación precisa del caudal de riego.
- El sistema de control de riego mostró una respuesta coherente entre el error, la fuerza de control y la señal PWM aplicada a la bomba, lo que confirmó la correcta implementación del controlador PI en un entorno digital basado en ESP32. Asimismo, se observó que la dinámica del sistema depende directamente de las dimensiones del recipiente y del volumen de agua aplicado.
- De manera integral, el prototipo desarrollado demostró ser técnicamente viable, funcional y adaptable, permitiendo mitigar el DPV mediante una gestión eficiente del riego. Los resultados obtenidos validan la hipótesis de que un control automático basado en microclima y lámina de agua puede reducir el estrés hídrico en cultivos, optimizando el uso del recurso hídrico.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios experimentales de mayor duración que incluyan diferentes etapas fenológicas del cultivo, con el fin de evaluar el impacto del control de riego sobre el crecimiento, rendimiento y salud de la planta a largo plazo.
- Para mejorar la robustez del sistema, se sugiere incorporar sensores industriales de mayor precisión como referencia comparativa, lo que

permitiría validar el desempeño de los sensores de bajo costo utilizados en el prototipo.

- Es recomendable ampliar el modelo matemático del sistema suelo–riego incorporando perturbaciones climáticas explícitas, como el DPV o la radiación solar, de modo que el controlador pueda adaptarse dinámicamente a cambios ambientales más complejos.
- En futuras implementaciones, se podría explorar el uso de controladores avanzados, tales como control predictivo basado en modelo (MPC) o control adaptativo, para mejorar la respuesta del sistema ante variaciones rápidas del microclima.
- Se sugiere integrar el sistema a una plataforma IoT para el monitoreo remoto, almacenamiento histórico de datos y análisis en tiempo real, lo cual facilitaría la toma de decisiones agronómicas y la escalabilidad del sistema.
- Desde el punto de vista experimental, se recomienda estandarizar las dimensiones del recipiente, el tipo de suelo y el método de riego, a fin de reducir la variabilidad y mejorar la repetibilidad de los ensayos.
- Finalmente, se aconseja evaluar la viabilidad del sistema en condiciones reales de campo, extendiendo su aplicación a otros cultivos y zonas climáticas, lo que permitiría validar su aplicabilidad práctica y su potencial impacto en la agricultura de precisión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. E. Kokieva, V. S. Trofimova, and I. R. Fedorov, "Greenhouse microclimate control," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1001, p. 012136, 2020.
- [2] A. A. A. Omer *et al.*, "Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025.
- [3] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 1998.
- [4] C. Grossiord *et al.*, "Plant responses to rising vapor pressure deficit," *New Phytologist*, vol. 226, pp. 1550–1566, 2020.
- [5] C. Amitrano *et al.*, "Leaf anatomical traits shape lettuce physiological response to vapor pressure deficit and light intensity," *Planta*, vol. 262, p. 48, 2025.
- [6] A. A. A. Omer *et al.*, "Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025.
- [7] DryGair, "¿Cuál es la humedad ideal para el cultivo de la albahaca?," *Blog DryGair*, 2021. [En línea]. Disponible: drygair.com.
- [8] Weenat, "Déficit de presión de vapor (DPV) en agricultura: una herramienta para optimizar la producción," *Weenat Blog*, 2023. [En línea]. Disponible: weenat.com.
- [9] J. E. Simon, M. Reiss-Bubenheim, R. J. Murray, and R. Joly, "Water stress-induced alterations in essential oil content and composition of sweet basil," *Journal of Essential Oil Research*, vol. 4, no. 1, pp. 71–75, 1992.
- [10] Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32 Datasheet*, Version 2.9, 2019.
- [11] Aosong Electronics Co. Ltd., *DHT11 Humidity & Temperature Sensor Datasheet*, 2018.
- [12] Texas Instruments, *LM193-N, LM2903-N, LM293-N, LM393-N Low-Power, Low-Offset Voltage Dual Comparators*, Datasheet, Rev. G, Oct. 2018.
- [13] Cytron Technologies, *HC-SR04 Ultrasonic Sensor User's Manual*, May 2013.

- [14] STMicroelectronics, *L298: Dual Full-Bridge Driver Datasheet*, January 2000.
- [15] AG Electrónica, *Bomba de Diafragma DC R385 – Datasheet*, No. Parte OKY5022-9, 2021.
- [16] G. P. Pereira, M. Z. Chaari, and F. Daroge, “IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32,” *IoT*, vol. 4, no. 3, pp. 221–243, 2023, doi: 10.3390/iot4030012.
- [17] M. A. Rosyadi, M. F. E. Purnomo, and S. P. Sakti, “Smart Hydroponic-Based IoT Using Fuzzy Bayes to Control Vapor Pressure Deficit (VPD) in Lettuce Plant,” in *Proc. 2023 Int. Conf. Artificial Intelligence Robotics, Signal and Image Processing (AIRoSIP)*, 2023, pp. 16–21, doi: 10.1109/AIRoSIP58759.2023.10873968.
- [18] Y. Li, “Remote Irrigation Control Based on LoRa Technology and Fuzzy PID Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 122613–122627, 2025.
- [19] M. A. Rosyadi, M. F. E. Purnomo, and S. P. Sakti, “Smart Hydroponic-Based IoT Using Fuzzy Bayes to Control Vapor Pressure Deficit (VPD) in Lettuce Plant,” in *Proc. 2023 Int. Conf. AIRoSIP*, 2023, pp. 16–21.
- [20] G. P. Pereira, M. Z. Chaari, and F. Daroge, “IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32,” *IoT*, vol. 4, no. 3, pp. 221–243, 2023.

APÉNDICES

APÉNDICE A: Código fuente del sistema embebido (ESP32)	90
APÉNDICE B: DATOS EXPERIMENTALES EN BRUTO DEL MICROCLIMA Y DEL SISTEMA DE RIEGO	94
APÉNDICE C Fichas técnicas de los componentes electrónicos Dame todas la fichas	96

APÉNDICE A: Código fuente del sistema embebido (ESP32)

```
const int trigPin = 12;
const int echoPin = 14;

bool plotMode = false;
bool printHeaderNext = true;

float ultima_dist = -1; // Inicialmente inválida
float alpha = 0.2;
bool emalnit = false;
float dist_ema = 0.0;

// Normalización (ajusta según tus valores)
const float dist_sec = 3.50;
const float dist_moj = 2.20;
float h = 0.0;

// CONTROL PI
const float Ts = 1.0f;
const uint32_t Ts_ms = 1000UL;
float sp_lamina = 0.90f;
float H_OVF = 0.98f;
float Kp = 1.2f;
float Ki = 0.005f;
float u_prev = 1.0f;
float e_prev = 0.0f;
bool overflow = false;
bool controlEnabled = true;
bool prevEnabled = true;
float pwm01 = 0.0f;

// PWM Y BOMBA (ESP32)
#define PWM_PIN 25
#define IN1_PIN 26
#define IN2_PIN 27
const uint32_t pwmFreq = 2000;
const uint8_t pwmRes = 10;
const int PWM_MIN = 25;
const int PWM_MAX = 100;

float medirDistanciaCM() {
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);

    unsigned long t = pulseIn(echoPin, HIGH, 30000UL);
    if (t == 0) return -1.0;
```

```

    return (t * 0.0343) / 2.0;
}

void setDirectionForward() {
    digitalWrite(IN1_PIN, HIGH);
    digitalWrite(IN2_PIN, LOW);
}

void stopMotor() {
    ledcWrite(PWM_PIN, 0);
    digitalWrite(IN1_PIN, LOW);
    digitalWrite(IN2_PIN, LOW);
}

uint32_t percentToDuty(int percent) {
    percent = constrain(percent, 0, 100);
    uint32_t maxDuty = (1UL << pwmRes) - 1;
    return (percent * maxDuty) / 100;
}

void applyPWM(int percent) {
    ledcWrite(PWM_PIN, percentToDuty(percent));
}

void handleSerialKeys() {
    while (Serial.available()) {
        char c = Serial.read();
        if (c == 'P' || c == 'p') {
            plotMode = !plotMode;
            printHeaderNext = true;
            if (plotMode) Serial.println("distancia_raw,distancia_filtrada,h,error,u,pwm01");
        }
    }
}

void setup() {
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    pinMode(trigPin, OUTPUT);
    pinMode(echoPin, INPUT);
    pinMode(IN1_PIN, OUTPUT);
    pinMode(IN2_PIN, OUTPUT);
    ledcAttach(PWM_PIN, pwmFreq, pwmRes);
    stopMotor();
    Serial.begin(115200);
    delay(300);
}

void loop() {

```

```

static uint32_t tCtrl = 0;
uint32_t now = millis();

handleSerialKeys();

float distancia = medirDistanciaCM();
bool lecturaValida = (distancia >= 0);

if (lecturaValida) {
    ultima_dist = distancia;

    if (!emaInit) {
        dist_ema = distancia;
        emaInit = true;
    } else {
        dist_ema = alpha * distancia + (1.0 - alpha) * dist_ema;
    }

    h = (dist_sec - dist_ema) / (dist_sec - dist_moj);
    h = constrain(h, 0.0, 1.0);
}

// ----- CONTROL PI -----
if (emaInit && (now - tCtrl >= Ts_ms)) {
    tCtrl = now;

    overflow = (h >= H_OVF);
    prevEnabled = controlEnabled;
    controlEnabled = (!overflow);

    float u = 0.0f, du = 0.0f, error = sp_lamina - h;
    int pwm = 0;
    pwm01 = 0.0f;

    if (!controlEnabled) {
        stopMotor();
    } else {
        if (!prevEnabled && controlEnabled) {
            e_prev = error;
        } else {
            du = Kp * (error - e_prev) + (Ki * Ts * error);
            u_prev = constrain(u_prev + du, 0.0f, 1.0f);
            e_prev = error;
        }

        u = u_prev;
        pwm = round(PWM_MIN + u * (PWM_MAX - PWM_MIN));
        pwm = constrain(pwm, PWM_MIN, PWM_MAX);
    }
}

```

```

    setDirectionForward();
    applyPWM(pwm);
    pwm01 = pwm / 100.0f;
}

// ----- SALIDA SERIAL -----
if (plotMode) {
    if (printHeaderNext) {
        Serial.println("distancia_raw,distancia_filtrada,h,error,u,pwm01");
        printHeaderNext = false;
    }
    Serial.print(ultima_dist, 2); Serial.print(",");
    Serial.print(dist_ema, 2);   Serial.print(",");
    Serial.print(h, 3);         Serial.print(",");
    Serial.print(error, 3);     Serial.print(",");
    Serial.print(u_prev, 3);    Serial.print(",");
    Serial.println(pwm01, 3);
} else {
    Serial.print("Dist: "); Serial.print(ultima_dist, 2);
    Serial.print(" cm | EMA: "); Serial.print(dist_ema, 2);
    Serial.print(" | h: "); Serial.print(h, 3);
    Serial.print(" | error: "); Serial.print(error, 3);
    Serial.print(" | u: "); Serial.print(u_prev, 3);
    Serial.print(" | pwm01: "); Serial.println(pwm01, 3);
}
}

delay(100);
}

```

APÉNDICE B: DATOS EXPERIMENTALES EN BRUTO DEL MICROCLIMA Y DEL SISTEMA DE RIEGO

Sensor Humedad	Sensor humedad filtrada	h35	error	u	du	pwm
adc35_raw=303	adc35_f=320	0,2856	0,6144	0,8539	-0,014222	0,89
adc35_raw=292	adc35_f=314	0,3306	0,5694	0,8027	-0,051153	0,85
adc35_raw=311	adc35_f=314	0,3307	0,5693	0,8055	0,002752	0,85
adc35_raw=368	adc35_f=314	0,3278	0,5722	0,8119	0,0064	0,86
adc35_raw=343	adc35_f=321	0,2784	0,6216	0,8743	0,062382	0,91
adc35_raw=331	adc35_f=328	0,226	0,674	0,9405	0,066204	0,96
adc35_raw=311	adc35_f=328	0,2295	0,6705	0,9396	-0,000873	0,95
adc35_raw=329	adc35_f=321	0,2803	0,6197	0,8817	-0,057864	0,91
adc35_raw=340	adc35_f=324	0,2593	0,6407	0,9102	0,028452	0,93
adc35_raw=318	adc35_f=327	0,2335	0,6665	0,9444	0,034227	0,96
adc35_raw=354	adc35_f=322	0,2682	0,6318	0,906	-0,038448	0,93
adc35_raw=323	adc35_f=324	0,2566	0,6434	0,9231	0,017161	0,94
adc35_raw=384	adc35_f=327	0,2345	0,6655	0,9529	0,029816	0,96
adc35_raw=387	adc35_f=325	0,251	0,649	0,9364	-0,016527	0,95
adc35_raw=314	adc35_f=329	0,2195	0,6805	0,9776	0,041225	0,98
adc35_raw=384	adc35_f=328	0,2316	0,6684	0,9664	-0,011219	0,97
adc35_raw=363	adc35_f=326	0,2414	0,6586	0,958	-0,008466	0,97
adc35_raw=300	adc35_f=319	0,2927	0,6073	0,8995	-0,058455	0,92
adc35_raw=329	adc35_f=316	0,316	0,584	0,8744	-0,02511	0,91

Tiempo	Analog-SH1	Analog-SH2	Analog-SH3	%SH1	%SH2	%SH3
0:02:30	2898	2823	2951	29	31	27
0:05:00	2851	2960	2817	30	27	31
0:07:30	2910	2901	2944	28	29	28
0:10:00	2916	2959	2936	28	27	28
0:12:30	2898	2942	2946	29	28	28
0:15:00	2918	2952	2988	28	27	27
0:17:30	2922	2848	2947	28	30	28
0:20:00	2905	2918	2955	29	28	27
0:22:30	2894	2927	3071	29	28	25
0:25:00	2912	2879	2921	28	29	28
0:27:30	2917	2890	2947	28	29	28
0:30:00	3139	2895	2939	23	29	28
0:32:30	2930	2937	2959	28	28	27
0:35:00	2928	2877	2982	28	29	27
0:37:30	2928	2835	2919	28	30	28
0:40:00	2923	2909	2941	28	28	28
0:42:30	2881	2883	2946	29	29	28

0:45:00	2877	2975	2927	29	27	28
0:47:30	2896	2889	2928	29	29	28
0:50:00	2879	3054	2974	29	25	27
0:52:30	3166	2817	2969	22	31	27
0:55:00	2868	2835	2908	29	30	28
0:57:30	2929	2946	2959	28	28	27
1:00:00	2953	2935	3071	27	28	25
1:02:30	2898	2898	2944	29	29	28
1:05:00	2921	2926	2960	28	28	27
1:07:30	2919	2955	2966	28	27	27
1:10:00	2896	2871	2987	29	29	27
1:12:30	2911	2738	2958	28	33	27
1:15:00	2960	2949	2986	27	27	27
1:17:30	2902	2919	2950	29	28	27
1:20:00	2925	2955	2954	28	27	27
1:22:30	2903	2891	2749	29	29	32
1:25:00	2815	2828	2976	31	30	27

APÉNDICE C Fichas técnicas de los componentes electrónicos Dame todas la fichas

Microcontrolador ESP32

Fabricante: Espressif Systems

Modelo: ESP32-WROOM-32

Descripción:

Microcontrolador de 32 bits con conectividad WiFi y Bluetooth integrada, utilizado como unidad central de procesamiento del sistema de monitoreo y control de riego.

Características principales:

- Voltaje de operación: 3.0 – 3.6 V
- Frecuencia de reloj: hasta 240 MHz
- ADC: 12 bits
- GPIO: múltiples pines configurables
- Comunicación: UART, I2C, SPI
- Conectividad: WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2

Aplicación en el proyecto:

Procesamiento de datos del microclima, cálculo del DPV, implementación del controlador PI y generación de señal PWM para la bomba de riego.

Sensor de Temperatura y Humedad Relativa DHT11

Fabricante: Aosong

Modelo: DHT11

Descripción:

Sensor digital utilizado para la medición de temperatura y humedad relativa del aire.

Características principales:

- Voltaje de operación: 3.3 – 5 V
- Rango de temperatura: 0 – 50 °C
- Precisión de temperatura: ± 2 °
- Rango de humedad relativa: 20 – 90 %
- Precisión de humedad: ± 5 %
- Salida: digital (un solo pin de datos)

Aplicación en el proyecto:

Medición de variables atmosféricas necesarias para el cálculo del Déficit de Presión de Vapor (DPV).

Sensor de Humedad del Suelo Capacitivo v1.2

Fabricante: Genérico

Modelo: Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2

Descripción:

Sensor analógico capacitivo utilizado para medir la humedad del suelo, con mayor resistencia a la corrosión en comparación con sensores resistivos.

Características principales:

- Voltaje de operación: 3.3 – 5 V
- Tipo de salida: analógica
- Rango de medición: proporcional al contenido de humedad del suelo
- Material del electrodo: PCB recubierto

Aplicación en el proyecto:

Monitoreo de la humedad del sustrato para la regulación del riego mediante el controlador PI.

Sensor Ultrasónico HC-SR04

Fabricante: Genérico

Modelo: HC-SR04

Descripción:

Sensor ultrasónico utilizado para la medición de distancia mediante tiempo de vuelo de ondas acústicas.

Características principales:

- Voltaje de operación: 5 V
- Rango de medición: 2 – 400 cm
- Precisión: ± 3 mm
- Pines: VCC, Trig, Echo, GND

Aplicación en el proyecto:

Medición de la lámina de agua en el sistema suelo-riego sin contacto directo con el agua o el sustrato.

Bomba de Agua DC

Fabricante: Genérico

Tipo: Bomba DC sumergible

Descripción:

Bomba de corriente continua utilizada para el suministro de agua en el sistema de riego automatizado.

Características principales:

- Voltaje de operación: 6 – 12 V DC
- Tipo de accionamiento: continuo
- Caudal: dependiente del voltaje aplicado

Aplicación en el proyecto:

Suministro controlado de agua al sistema de riego, regulado mediante señal PWM.

Módulo de Relé / MOSFET de Potencia

Fabricante: Genérico

Descripción:

Dispositivo de conmutación utilizado para accionar la bomba de riego desde el microcontrolador.

Características principales:

- Voltaje de control: 3.3 – 5 V
- Corriente máxima: dependiente del modelo
- Aislamiento eléctrico entre control y carga

Aplicación en el proyecto:

Interfaz de potencia entre el ESP32 y la bomba de riego.