

Diseño e implementación de un control de humedad del suelo bajo cubierta usando lógica difusa mediante PLC

Design and implementation of a soil moisture control under cover using fuzzy logic through PLC

Aldemar Fonseca Velasquez



Camila Cárdenas Miranda



Sebastián Pedraza Tunjo



Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Héctor Tangarife Escobar



SENA, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 12/12/2022

Aceptado: 02/03/2023

Publicado: 05/05/2023

Correspondencia de autores:
hitangarife@misena.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Promover la inclusión tecnológica hacia el sector agrícola, es importante contar con diversos sistemas de control para la optimización de procesos y calidad de producción. El presente documento tiene como finalidad realizar el diseño e implementación de un control de humedad del suelo bajo cubierta usando lógica difusa mediante PLC. **Metodología:** Bajo un ambiente controlado se simuló las condiciones ambientales próximas a un invernadero, donde se realizó la caracterización del sensor de humedad del suelo, además se diseñó de una interfaz gráfica mediante Interfaz Humano Máquina - HMI, donde es posible el monitoreo y el control del cultivo. Se estableció la comunicación entre el controlador y las tarjetas de desarrollo para el flujo de datos. Adicionalmente, se creó una base de datos en un servidor web embebido y una dashboard con el objetivo de visualizar y almacenar la variable ambiental en tiempo real. **Resultados:** La caracterización del sensor de humedad, facilitó el funcionamiento adecuado del control basado en lógica difusa. La interfaz de usuario permitió la manipulación del sistema de manera fácil y didáctica, ayudando a la adopción tecnológica. El almacenamiento y la visualización fueron posibles gracias a la correcta elección de los protocolos de comunicación implementados. **Conclusiones:** El desarrollo de este sistema en un prototipo a escala permite ser implementado en ambiente agrícola, además aporta a la innovación y adaptación de los agricultores a nuevas tecnologías.

Palabras clave: almacenamiento, control difuso, humedad del suelo, invernadero, irrigación, optimizar, visualización.

Abstract

Objective: Promote technological inclusion in the agricultural sector, it is important to have various control systems to optimize processes and production quality. The purpose of this document is to carry out the design and implementation of a soil humidity control under the roof using fuzzy logic through PLC. **Methodology:** Under a controlled environment, the environmental conditions close to a greenhouse were simulated, where the characterization of the soil moisture sensor was carried out, in addition, a graphical interface was designed through Human Machine Interface - HMI, where monitoring and control of the crop is possible. Communication between controller and development boards for data flow is established. Additionally, a database was created in an embedded web server and a dashboard in order to visualize and store the environmental variable in real time. **Results:** The characterization of the humidity sensor facilitated the adequate operation of the control based on fuzzy logic. The user interface allowed the manipulation of the system in an easy and didactic way, helping technological adoption. Storage and visualization were possible thanks to the correct choice of the implemented communication protocols. **Conclusions:** The development of this system in a scale prototype allows it to be implemented in an agricultural environment, and also contributes to the innovation and adaptation of farmers to new technologies.

Keywords: storage, fuzzy control, soil moisture, greenhouse, irrigation, optimization, visualization.

Introducción

Las actividades agrícolas relacionan dos estrategias de producción, por un lado, a campo abierto, en donde no se requiere ninguna protección para los cultivos, propicia para sistemas de bajo costo y plantas que toleran un rango amplio de factores externos, sin embargo, para productos más susceptibles y factores ambientales adversos, es necesario implementar estrategias que permitan proteger el cultivo contra lluvia, viento, que faciliten el control de microclima interno, mejoren la productividad, incrementen el ahorro de agua, y la protección de la estructura del suelo, entre otros [1, 2, 3], condiciones que al mismo tiempo son ventajas competitivas respecto a la producción agrícola a campo abierto.

Una de las actividades principales que se realizan bajo cubierta es el manejo eficiente del recurso hídrico, tareas que presentan dependencia e interacción con el suelo, el clima y la planta, esencial durante el ciclo productivo y de ejecución recurrente en todos los procesos agrícolas.

La cantidad de agua que se debe aplicar y la frecuencia está determinada por el tipo de suelo, la textura, densidad aparente y real, porosidad, tamaño de poro [4, 5, 6]. La capacidad de almacenamiento de agua y la retención de humedad es una característica relevante para la toma de decisiones, la humedad aprovechable (HA) es una de las variables más significativas del suelo, ya que presenta una relación directa con la productividad de los sistemas agrícolas y forestales. Según Terán et al (2007), hay fuerzas de adhesión y cohesión que determinan el potencial de humedad y las curvas hidrofísicas permiten identificar las constantes de humedad del suelo, denominadas capacidad de campo - CC y punto de marchitez permanente PMP, las cuales, son críticas para establecer los ciclos de irrigación [1, 7, 8].

En la actualidad existe la necesidad de mejorar los rendimientos sobre la producción, debido al incremento de la población y la necesidad de restringir el incremento de las fronteras agrícolas [9]. Las nuevas tecnologías juegan un rol importante para facilitar las actividades convencionales como la irrigación y su eficiencia en campo, manteniendo condiciones similares a las actuales. Adicionalmente, la producción agrícola convencional presenta una diferencia significativa respecto a los demás sectores relacionada con el avance de las tecnologías, entre las que cabe resaltar, internet de las cosas - IoT, comunicación, automatización, robótica, procesamiento de imagen, inteligencia computacional, industrial 4.0, diferencia que se reduce a través de la implementación de la agricultura 4.0 [10, 11]. Por otro lado, se han identificado grandes deficiencias en el sector agrícola como baja productividad dada por los altos consumos del recurso hídrico, en donde la producción vegetal, consume alrededor de un 70% del agua dulce que podría ser destinada para consumo [12], por tanto, se pretende, integrar nuevas tecnologías que permitan hacer más eficiente el uso del agua mediante el desarrollo de un prototipo de sistema de supervisión de variables ambientales y control del recurso hídrico para un invernadero, utilizando tecnología de PLC e IoT, a través de la aplicación de una estrategia de control difuso para facilitar las tareas de irrigación.

Para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico instituciones, grupos de investigación y centros de investigación, han venido implementado tecnologías, entre las que se pueden resaltar, sistemas de irrigación basados en un controlador fuzzy para aplicaciones en áreas de riego pequeñas, donde se mide, intensidad de luz, humedad del aire, temperatura entre otras variables para aplicaciones a pequeña escala mediante tarjeta de desarrollo [13, 14, 15, 16]. Por otro lado, se ha implementado una plataforma móvil que se desplazan por un jardín tomando mediciones y activan un sistema de aplicación de riego remotamente [17, 18, 19].

En otros escenarios se han realizado pruebas con controladores fuzzy para desarrollar un sistema de control inteligente y optimizar la eficiencia energética en un sistema de riego presurizado [20], se implementa sobre

un banco con instrumentación que simula el cabezal de un sistema de riego [21]. Otros estudios relacionan comparaciones entre un controlador PID y un controlador Difuso para identificar la mejor opción frente al uso del recurso hídrico a partir de modelamiento de microclima mediante uso de PID, el cual presenta mejor comportamiento [22, 23, 24].

Finalmente se obtiene el presente escrito que permite identificar, el diseño de la adquisición de señal, el tratamiento de la misma, los resultados obtenidos, tanto del monitoreo de las variables como del controlador implementado con las respectivas pruebas en invernadero a escala.

Metodología

Caracterización del sensor

Para el desarrollo del controlador con lógica difusa se hace necesario la implementación de un sensor de humedad del suelo, para este proyecto se utilizó el sensor de referencia SEN0193. Con el objetivo de garantizar mediciones con alto nivel de exactitud y el correcto funcionamiento del control de lógica difusa, se realizó la caracterización del mismo implementando un instrumento patrón, Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas sensor Sen0193 Vs instrumento de referencia

Sensor de humedad del suelo		Instrumento patrón	
			
Instrumento:	Sensor analógico de humedad del suelo	Instrumento:	Higrómetro
Referencia:	SEN0193	Referencia:	Genérico
Voltaje de operación:	3.3V-5.5V	Temperatura de funcionamiento:	-9-100 °C
Señal de voltaje de salida	0V-3V	Precisión de la humedad:	±5% RH
Resolución	1%	Rango de humedad:	10% -98%

Fuente: Elaboración propia

Para la caracterización del sensor de humedad del suelo SEN0193, se utilizó como instrumento patrón un Higrómetro genérico, ambos sensores se instalaron sobre un terreno con las mismas condiciones ambientales, se registraron los datos sometiendo el terreno al aumento de gradual de humedad y como resultado se obtuvo la ecuación (1).

$$y = 0.9996x + 1.9093 \tag{1}$$

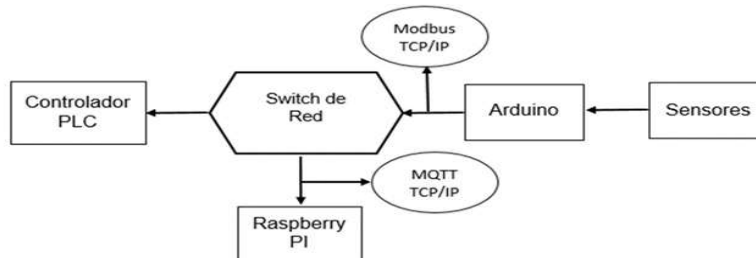
Donde:

y = Humedad del suelo caracterizada
x = Humedad del suelo medida en tiempo real

Protocolos de comunicación controlador – tarjetas de desarrollo

Con el objetivo de garantizar el monitoreo de la variable ambiental a controlar, se realiza una interconexión entre el controlador con las tarjetas de desarrollo, creando una red local. Primero se realiza la adquisición de la variable ambiental proveniente del sensor por parte de la tarjeta de desarrollo (Arduino), posteriormente mediante el protocolo de Modbus TCP/IP se comunica y se envía la información al controlador PLC, donde el Arduino actúa como servidor y el PLC como cliente, a continuación, se visualiza en la Figura 1 el esquema implementado.

Figura 1. Estructura de la comunicación entre el PLC y Arduino



Fuente: Elaboración propia

Servidor

La configuración y programación de Modbus TCP/IP Server se implementó en la tarjeta de desarrollo Arduino. Se configuran parámetros como: IP y máscara del servidor para la comunicación, también se hizo uso de la librería ModbusIP.h, donde se realiza la creación de registros correspondientes para la recepción de los valores de salida del controlador de lógica difusa, adicionalmente se realiza la programación correspondiente para el envío del valor de humedad medida en tiempo real, con el objetivo de retroalimentar el sistema y así implementar un control en lazo cerrado.

Cliente

La configuración de Modbus TCP/IP Client se implementó en el lenguaje Ladder haciendo uso de dos bloques MB_CLIENT del software Tia Portal, el primero se configuró para modo escritura (A), y el segundo para modo lectura (B), en ambos se establecen parámetros como puerto de comunicación #502, longitud de los datos, dirección de escritura, un búfer de datos para que los datos se reciban o envíen al servidor Modbus, entre otros.

Por otro lado, para el almacenamiento y visualización de las variables ambientales se establece la comunicación por medio del protocolo MQTT, el cual funciona sobre la misma red local, esta comunicación se realiza entre el Arduino (Publicador) y la tarjeta Raspberry PI (Suscriptor).

Publicador

La configuración de cliente MQTT se realiza en la tarjeta de desarrollo Arduino y por medio de la librería PubSubClient se establece la comunicación hacia el suscriptor donde se realiza la publicación a un topic que corresponde a la variable sensada en el sistema.

Suscriptor

Para la comunicación respectiva, previamente se realiza la instalación del Broker Mosquito MQTT en la Raspberry PI, por otra parte, en la herramienta de programación visual llamada Node RED se establecen nodos que permiten suscribirse al topic publicado desde Arduino obteniendo el dato de la variable sensada.

Base de datos e IoT

Para la creación de la base de datos, previamente se estableció comunicación entre la tarjeta de desarrollo Arduino y el ordenador Raspberry PI.

Partiendo de la comunicación establecida entre el arduino y el ordenador Raspberry PI, la cual envía datos de las variables ambientales adquiridas por el Arduino por medio del protocolo MQTT, hacia una herramienta de Node RED instalada en la Raspberry PI, funcionando como Gateway en la red de comunicación.

Una vez que los datos de los sensores se encuentren en Node RED, se procede a realizar la programación en el editor de flujo añadiendo y conectando nodos, con el objetivo de publicarlos en una Dashboard, la cual, es una herramienta de Node RED que permite visualizar los datos en tiempo real de manera gráfica y tabular. Se podrá acceder a la misma por medio de la dirección IP de la Raspberry PI y el puerto 1880.

Para el almacenamiento de la información se construyó una base de datos utilizando SQLite como sistema gestor de base de datos. El servidor donde se aloja dicha base de datos es un servidor web embebido, alojado en el dispositivo que trabaja sobre el sistema operativo Raspbian que se basa en una distribución GNU/Linux llamada Debian. la herramienta para la administración de la base de datos SQLite es phpLiteAdmin instalada en la Raspberry PI, que permite la visualización de la información de forma tabular además de la manipulación de los datos como, por ejemplo: borrar, consultar, modificar, exportar e importar, entre otros.

Control basado en lógica difusa

La estructura de este modelo que integra lógica difusa, se divide en tres etapas las cuales corresponden a: interfaz de Fusificación, Inferencia e interfaz de Defusificación.

Fusificación

Esta primera etapa fue desarrollada en lenguaje ladder, consiste en determinar los límites del universo discurso y para ello se utilizó una herramienta del software MATLAB llamada FuzzyLogic.

El universo discurso se dividió en 8 funciones de membresía en un rango de [-100 100] expresadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Funciones de membresía

Nombre	Tipo función	Parámetros
EGN (error grande negativo)	Trapezoidal	[-100 -100 -25 -23]
EMN (error medio negativo)	Triangular	[-25 -15 -5]
EPN (error pequeño negativo)	Triangular	[-8 -4 0]
EP (Error pequeño)	Triangular	[0 3 6]
EMP (Error medio pequeño)	Triangular	[4 8 12]
EM (Error medio)	Triangular	[9 13 17]
EMG (Error medio grande)	Triangular	[15 20 25]
EG (error grande)	Trapezoidal	[23 25 100 100]

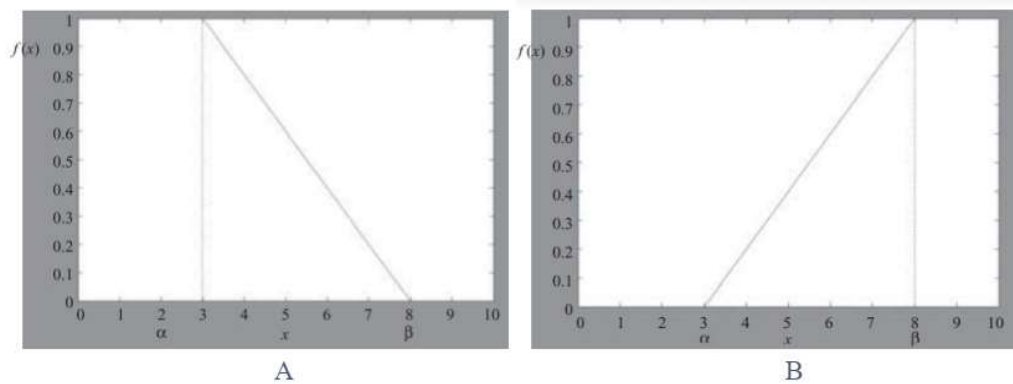
Fuente: Elaboración propia

Para delimitar el dominio de cada una de las funciones de membresía previamente fue necesario tener en consideración tipo de función de saturación Figura 2, adicionalmente se presenta la ecuación (2) correspondiente a la función de saturación a la derecha y la ecuación (3) relacionada con la función de saturación a la izquierda. Estas ecuaciones se implementan para cada una de las 8 funciones de membresía.

$$f(x) = \begin{cases} x \leq \alpha, & 1; \alpha \leq x \leq \beta, & \frac{x - \beta}{\alpha - \beta}; x > \beta, & 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$f(x) = \begin{cases} x \leq \alpha, & 0; \alpha \leq x \leq \beta, & \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}; x > \beta, & 1 \end{cases} \quad (3)$$

Figura 2. Función tipo saturación A. Derecha B. Izquierda



Fuente:[25]

Una vez definido los parámetros de las funciones de membresía, se procedió a realizar las funciones matemáticas en el lenguaje ladder, donde se tiene en cuenta el tipo de función, ya sea saturación derecha o izquierda, considerando valores como pendientes, dominio y rango.

Para mostrar la implementación en lenguaje ladder se presenta la primera función de membresía llamada error grande negativo (EGN), que es de tipo saturación por derecha, se empleó la ecuación (4).

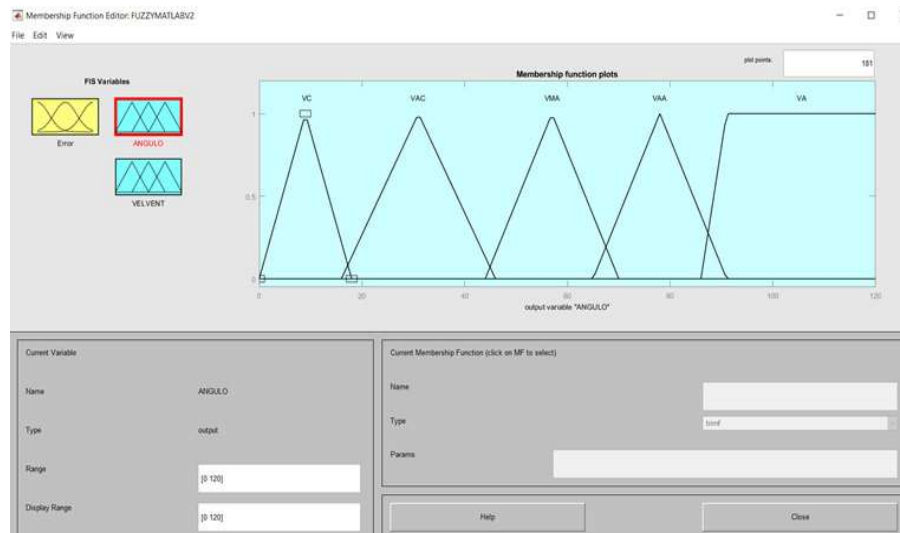
$$EGN(x) = \begin{cases} x < -25, & 1; -25 \leq x \leq -23, & \frac{x - (-23)}{(-25) - (-23)}; x > 23, & 0 \end{cases} \quad (4)$$

Inferencia

Para la segunda etapa, el método empleado en este proyecto fue el de Mamdani, considerando las reglas lingüísticas, las cuales fueron introducidas en FuzzyLogic de MatLAB.

Con ayuda de la herramienta FuzzyLogic también se definieron los parámetros de las dos funciones de membresía consecuentes. La primera función de membresía consecuente llamada ÁNGULO que tiene un rango de [0 120], Figura 3, que tiene como objetivo la apertura de la válvula servo controlada para dar inicio a la irrigación si se desea aumentar el porcentaje de humedad en el suelo.

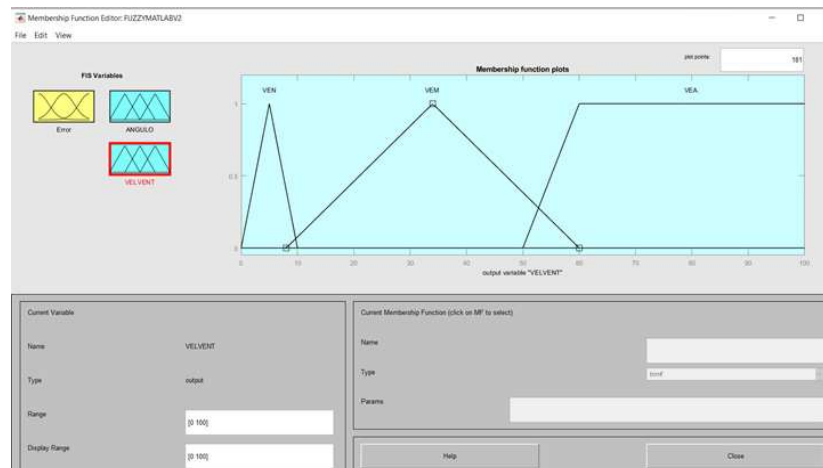
Figura 3. Función de membresía consecuente ÁNGULO en MatLAB



Fuente: Elaboración propia

La segunda función de membresía consecuente llamada VELVENT (Velocidad ventilador) que tiene un rango de [0 100], Figura 4, tiene como objetivo hacer funcionar el extractor a distintas velocidades haciendo circular el aire, esto para el caso de que se quiera disminuir y mantener el porcentaje de humedad.

Figura 4. Función de membresía consecuente VELVENT en MatLAB.



Fuente: Elaboración propia

Una vez definido los parámetros de funciones de membresía consecuentes, se procedió a realizar las funciones matemáticas en Ladder, para ello primero se realizó la conversión de cada una de las funciones de membresía antecedentes a un valor $u(x_n)$, estos valores se ingresaron a las funciones matemáticas para obtener los valores de x_n haciendo uso de los parámetros establecidos de las dos funciones de membresía consecuentes. Esto se realiza tantas veces como el número de reglas establecidas, obteniendo como resultado un conjunto difuso.

El controlador difuso tiene dos funciones de membresía consecuentes, nombradas anteriormente. Para el desarrollo de la inferencia en lenguaje Ladder se dividió en dos partes, la primera parte corresponde a la función de membresía consecuente ÁNGULO y la segunda parte corresponde a la función llamada VELVENT.

Para mostrar la implementación de la función en lenguaje Ladder, se presenta el desarrollo de la primera regla lingüística denominada EP (Error pequeño), tanto como para saturación por izquierda EP/ como para saturación por derecha EP\ se realiza la conversión a un valor $u(x_1)$ y (x_2) respectivamente, siendo estos valores los que ingresan a la función matemática expresada en las ecuaciones (5) y (6), obteniendo el valor de x_1 y x_2 .

$$x_1 = \{0 \leq x \leq 3, \quad (u(x_1) * (9 - 0)) + 0; 0, \quad \text{de otra manera} \quad (5)$$

$$x_2 = \{3 < x \leq 6, \quad (u(x_2) * (9 - 18)) + 18; 0, \quad \text{de otra manera} \quad (6)$$

Defusificación

Una vez realizado el método de inferencia obteniendo como resultado un conjunto de valores difusos, se procedió a realizar la tercera etapa, el método de defusificación con el fin de determinar un único valor dentro del rango de trabajo tanto para la válvula como para el ventilador. Estos dos valores escalares se calcularon haciendo uso del método del centroide, por medio de la ecuación (7). El cálculo del centroide1 correspondiente a control de la válvula y el centroide2 correspondiente al control del ventilador, se desarrolló en el lenguaje Ladder.

$$salida = \frac{\sum_{x=i}^b \mu(x) \cdot xNUM}{\sum_{x=i}^b \mu(x)} \quad (7)$$

Donde:

$\mu(x)$ = Valores fusificados de cada función de membresía de la entrada.

$xNUM$ = Valores correspondientes a los conjuntos difusos resultante de la inferencia.

Resultados y discusión

Diseño interfaz de usuario

La interfaz de usuario para el control de lógica difusa permite seleccionar para cada cultivo el tipo de alimento a irrigar, en total se cuentan con cuatro opciones de alimentos, Tabla 3. Para cada alimento seleccionado la interfaz también cuenta con dos cuadros de texto que permiten visualizar la humedad actual y la humedad preestablecida para ese tipo de alimento.

Tabla 3. Porcentaje de humedad preestablecida para cada alimento

Tipo	Humedad Preestablecida
Tomate, Pimiento, Berenjena	32%
Melón	35%
Calabacín	38%
Pepino	40%

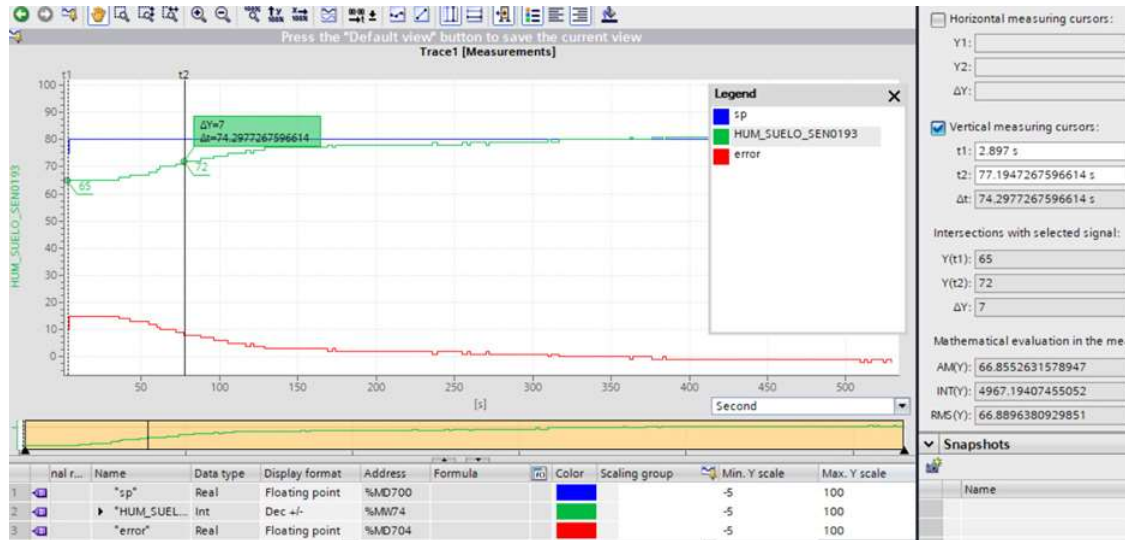
Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento del control basado en lógica difusa

Con el fin de mostrar los resultados obtenidos del desempeño del control con lógica difusa se presentan los valores de la respuesta transitoria como son: tiempo de retardo, tiempo de subida y tiempo de asentamiento.

En la Figura 5, podemos evidenciar la respuesta del sistema, en donde el SP (Set Point) está representado en color azul; la variable de proceso HUM_SUELO_SEN0193 representado en color verde, y de color rojo el error obtenido del sistema.

Figura 5. Tiempo de retardo en la respuesta la respuesta transitoria



Fuente: Elaboración propia

Tiempo de retardo

Corresponde al tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final, de acuerdo a la Figura 15 este tiempo se encuentra calculado a través de la ecuación (8):

$$\frac{H_{inicial} + H_{sp}}{2} = H_m$$

$$\frac{65 + 80}{2} = H_m$$

$$72.5 = H_m \quad (8)$$

Donde:

$H_{inicial}$: Humedad inicial (%)

H_{sp} : Humedad de referencia (%)

H_m : Humedad media (%)

Los cursores t1 y t2 ubicados al inicio de la entrada del escalón unitario y en el valor de humedad media, determinan el tiempo de retardo, ecuación (9).

$$\begin{aligned}
 t_2 - t_1 &= t_d \\
 77.194 - 2.897 &= t_d \\
 74.297 &= t_d
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Donde:

t_1 : Tiempo de inicio (s)

t_2 : Tiempo en humedad media (s)

t_d : Tiempo de retardo (s)

Tiempo de subida

Es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 0 al 100% de su valor final, en la Figura 6 se es posible apreciar el valor de 80% de humedad en un tiempo de subida t_r igual a 315.175s

Figura 6. Tiempo de subida en la respuesta la respuesta transitoria

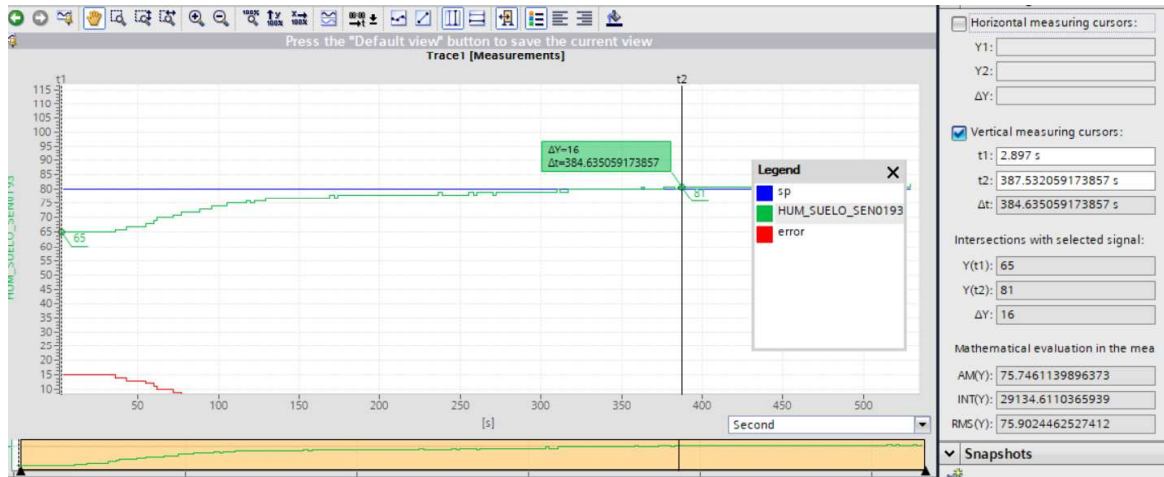


Fuente: Elaboración propia

Tiempo de asentamiento

Es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%). El tiempo de asentamiento se relaciona con la mayor constante de tiempo del sistema de control. El valor obtenido, en la Figura 7 es de 81% con un tiempo de asentamiento t_s de 384.635s.

Figura 7. Tiempo de asentamiento en la respuesta la respuesta transitoria



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se muestra un resumen de los resultados en otras pruebas realizadas con suelo totalmente seco.

Tabla 4. Pruebas de funcionamiento control lógica difusa con tierra seca

Variable	Prueba 1	Prueba 2
Humedad inicial	19%	20%
Sp	40%	35%
td	18.42 min	7.17 min
tr	21.90 min	14.32 min
ts	24.51 min	14.78 min
Error absoluto	3%	1%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 también se muestra el resumen de otras pruebas realizadas, sin embargo, para estas pruebas la tierra estaba previamente húmeda, por tanto, la absorción de agua es más rápida que cuando la tierra se encuentra totalmente seca.

Tabla 5. Pruebas de funcionamiento control lógica difusa con tierra húmeda

Variable	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Humedad inicial	65%	35%	50%
Sp	80%	50%	70%
td	1.24 min	2.60 min	4.62 min
tr	5.25 min	7.13 min	12.9 min
ts	6.41 min	8.11 min	14.46 min
Error absoluto	1%	0%	2%

Fuente: Elaboración propia

Base de datos e IoT

Tras el establecimiento de la conexión entre la tarjeta de desarrollo Arduino y la Raspberry PI mediante MQTT se realizó la programación añadiendo y conectando nodos en el editor de flujo de Node RED, donde posteriormente se envía el valor de la variable ambiental sensada a una Dashboard y a una base de datos.

Dashboard

Para la visualización en tiempo real se realizó una Dashboard en Node Red, de manera tabular y gráfica se representa la variable sensada así como la fecha del registro. La Dashboard se divide en dos pestañas, la primera pestaña se visualizan los datos de manera tabular organizados de manera ascendente, Figura 8.

Figura 8. Visualización tabular y grafica de datos en Dashboard

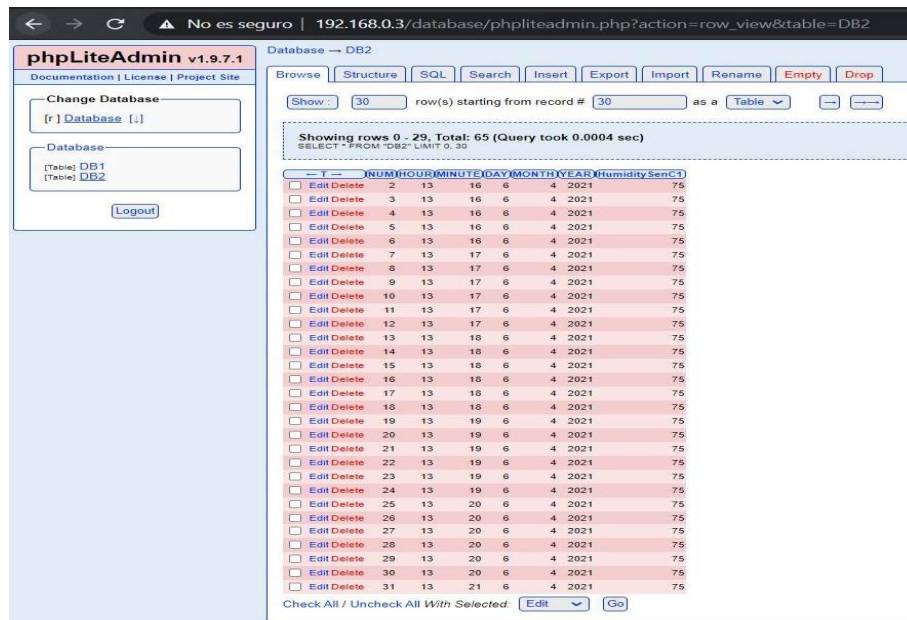


Fuente: Elaboración propia

Base de datos

La información almacenada en la base de datos se encuentra establecida en la herramienta de administración phpLiteAdmin que incorpora un motor SQL que permite además de visualizar de forma tabular la información en tiempo real, enviar comandos y manipular los datos ya sea insertar, borrar, consultar, modificar, exportar e importar, entre otros Figura 9.

Figura 9. phpLiteAdmin



Fuente: Elaboración propia

Para iniciar sesión en la base de datos se deben seguir dos pasos, el primero, ingresar en el buscador web la dirección correspondiente a http://RPI_IP_Address/database/phpliteadmin.php, posteriormente se ingresa con la contraseña: admin, de esta manera se accede a la página principal de phpLiteAdmin.

Conclusiones

Se establece una estrategia de control difuso que permite controlar la apertura y cierre de actuadores para el manejo de la irrigación, mediante fusificación, inferencia y defusificación en lenguaje ladder a través de la implementación de funciones matemáticas, asignaciones y comparaciones.

Se realiza el diseño e implementación de un prototipo de sistema de supervisión de variables ambientales a través del uso de sensores de humedad y temperatura, que toman información del invernadero y se envía a internet para acceso con una dirección que puede ser pública a través de un celular o PC, adicionalmente, se implementa un control para las salidas hacia las electroválvulas mediante un PLC que dispone de conexión a HMI para visualización en campo del estado funcional del sistema.

La forma de control autónoma del modelo de irrigación, se desarrolla mediante la implementación de Fuzzy Logic Design del software MATLAB®, el cual facilita la implementación de la lógica difusa sobre la variable humedad del suelo, lo que permite llegar a las condiciones deseadas de aplicación de humedad en función de la necesidad del riego.

Se identifica que el tiempo de respuesta del controlador es susceptible a factores inherentes al suelo, entre los que vale la pena resaltar; porcentaje de humedad inicial del suelo, características físicas como: porosidad, textura y estructura lo que está relacionado con el tipo de suelo, factores ambientales externos como temperatura ambiental, humedad ambiental, y otros aspectos como el sistema de riego.

La implementación involucra el uso de diversas tecnologías, para las cuales la comunicación se vuelve importante, para esto se usan protocolos entre el microcontrolador y el servidor web embebido en la

Raspberry PI lo que permite ver el registro de los datos obtenidos de los sensores en la base de datos SQLite y comunicación entre el controlador y la HMI para registro de la información en campo [25, 26, 27].

Se concluye que mediante el uso de las instrucciones básicas del software TIA Portal, es posible el desarrollo de la Fusificación, inferencia y Defusificación en el lenguaje Ladder utilizando las instrucciones como: funciones matemáticas, asignaciones y comparaciones, teniendo como referencia la aplicación de Fuzzy Logic Design del software MatLAB, esto para la forma de control autónoma que involucra lógica difusa.

El tiempo de respuesta del controlador difuso se ve afectado por distintos aspectos externos, tales como: Estado inicial del porcentaje de humedad del terreno, tipo de suelo, temperatura ambiental, sistema de riego, entre otros.

Se logra integrar diferentes tecnologías a través de estrategias de comunicación entre el microcontrolador y el servidor web embebido en la Raspberry PI, permitiendo ver el correcto registro de los valores sensados en la base de datos creada en SQLite.

El desarrollo de este sistema en un prototipo a escala permite implementarlo en un ambiente agrícola, además de aportar a la innovación y adaptación de los agricultores hacia las nuevas tecnologías.

Referencias bibliográficas

1. C. Terán, M. Valenzuela, E. Villaneda, G. Sánchez, J. Hío. *Manejo del riego y fertirrigación en tomate bajo cubierta en la sabana de Bogotá*. Manual Técnico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Corpoica- CI Tibaitatá. 2007.
2. J. Pérez, "Tecnología y manejo del cultivo en invernaderos: retos y factores de éxito 1. Introducción: el reto de la alimentación en el siglo XXI 2. El modelo tecnológico de la horticultura", Instituto de Investigación Agraria y Pesquera - IFAPA. 2017.
3. O. Rojas., J. Vaca., Y. Vaca. *Manual de usuario para el sistema automatizado de invernadero hidropónico*. Tesis. Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería. UNAD. Tolima, Colombia. 2017.
4. L. Urriola S., *¿Why study the physical properties of the soil?* semillas del este. Vol. 1, Nº 1, pp. 23-26, oct. Universidad de Panamá. 2020.
5. A. Hernández., *Cambios de la capacidad de almacenamiento de humedad en suelo por factores intrínsecos edáficos y de manejo*. Tesis postgrado de edafología. Campus Montecillo. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Montecillo Texcoco México. 2018.
6. I. Novillo., M. Carrillo., J. Cargua., V. Moreiral., K. Alban., F. Morales. Physical properties of the soil in different agricultural systems in the province of Los Ríos, Ecuador. Revista Temas Agrarios: - Vol. 23: (2). pp 177 - 187. Julio 2018. <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>
7. Hernández-Mendoza, T. M., & Carrillo-González, R., & Salcedo-Pérez, E., & Rodríguez-Macias, R., & Bugarin-Montoya, R., & Galvis-Spinola, A., & Zamora-Natera, F. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. Revista Terra Latinoamericana: Vol. 25: (4). pp 419 - 425. 2007. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315558010>
8. J. Jódar., E. Carpintero., S. Martos., A. Ruiz., C. Marín., J. Cabrera., E. Navarrete., A. González., L. Lambán., C. Herrera., M González. *Combination of lumped hydrological and remote-sensing models to evaluate water resources in a semi-arid high altitude ungauged watershed of Sierra Nevada (Southern Spain)*. Vol. 625. pp. 285-230. Junio 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.300>

9. V. Lopes., L. Leal., L. Fernandes., F. Miziara., L. Guimarães. *Land-use dynamics in a Brazilian agricultural frontier region*, 1985-2017. Volumen 97. Septiembre de 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104740>
10. F. da Silveira., F. Lermen., F. Amaral. *An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages*. Computers and Electronics in Agriculture. Volumen 189. Octubre 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106405>
11. D. Muhl., L. De Olivera. *A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0*. Heliyon. Volume 8. Edición 5. pp. 1-13. Mayo 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09369>.
12. D. Díaz., J. Vélez y P. Rodríguez. *Efecto de la aplicación de riego controlado en la producción y calidad del fruto de Pyrus communis L., cv. Triunfo de Viena*. Departamento de ingeniería civil y agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Acta Agronómica. [online]. 2016, vol. 65, No. 2, pp 156-163. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n2.49650>. Abril 2016.
13. E. Córdoba, A. Santos y S. Gómez. *Sistema automático de irrigación de plantas y monitoreo de variables web*. Universidad de Antioquia. Cap. de libro Ingeniería mecánica y mecatrónica: Innovación para un nuevo país. Colombia. 2018.
14. S. Ossa Duque. *Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos*. Vector, Vol. 12, pp. 51-60. DOI: 10.17151/vect.2017.12.6. Junio 2017.
15. M. Ríos Marín, L. Sánchez Padilla, and J. Gómez Gómez, *Sistema de monitoreo agrícola mediante redes inalámbricas de sensores para el monitoreo de variables ambientales sismo-agro*” Ing. al día. vol. 2. No. 2. pp. 4–22. 2015.
16. A. H. Alarcón López, G. Arias Vargas, C. J. Díaz Ortiz, y J. D. Sotto Vergara. “*Design of a control and automation system for temperature, soil moisture and relative humidity to optimize crop yield under cover in CORHUILA*” Cuarto congreso internacional AmITIC 2017, pp. 48–53, Popayan, Colombia. Septiembre 2017.
17. A. Ríos, A. Hall, K. Contreras, A. Von y D. Cáceres. *Sistema de irrigación automático asistido por robot*. Revista Universidad Tecnológica de Panamá. Revista de iniciación científica. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.0.3247>. Edición especial No 5. Panamá. 2021.
18. M. Vucha, K. Jyothi, K. Kumari, and R. Karthik, “*Cost effective autonomous plant watering robot*” Int. J. Recent Technol. Eng., vol. 7, no. 5, pp. 67–69, 2019.
19. H. Nagaraja, R. Aswani, and M. Malik, “*Plant Watering Autonomous Mobile Robot*” IAES Int. J. Robot. Autom., vol. 1, No. 3, 2012.
20. W. JunHui, M. Yaping, C. Jie, W. Yusheng, S. Huiping and L. Kaiyan, “*Fuzzy Control System of Substrate Lettuce Cultivation Based on Light-Dependent Irrigation Control Method*”. 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), pp. 412-417 <http://doi.org/10.1109/ICECE48499.2019.9058503>. Abril 2020.
21. K. Mendonça, H. Moreira, H. Gomes, J. Villanueva, T. Flores y L. Toledo. *Aplicação De Um Controlador Baseado Na Lógica Fuzzy Para O Controle Da Vazão E Da Pressão De Um Sistema De Irrigação*. Sociedad Brasileira de Automática. Volumen 2. No 1. DOI: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1298>. Ciudad Universitaria Zeferino Vaz. 2020.
22. C. Cohen, J. Rodríguez y R. Salgado. *Modelado del Microclima de un Cultivo de Sandía (Citrullus lanatus) en la Sub-región Sabana del Departamento de Sucre*, Colombia. Información tecnológica. Volumen 29. No 5. La Serena. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500335>. 2018.

23. D. D. López Juvinao, L. M. . Torres Ustate, y F. O. Moya Camacho, "Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 2, pp. 20–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.3857>
24. E. J. De la Hoz Domínguez, T. J. . Fontalvo Herrera, y A. A. Mendoza Mendoza, "Aprendizaje automático y PYMES: Oportunidades para el mejoramiento del proceso de toma de decisiones", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 1, pp. 21–36, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3506>
25. J. A. Ramírez, H. O. Sarmiento y J. M. López-Lezama, "*Diseño de un clasificador difuso para el establecimiento de los estados funcionales de un sistema de producción de aire medicinal*". Información Tecnológica. Vol. 28, No. 6, pp. 147–160, La Serena. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600016>. Diciembre 2017.
26. V. Rahangadale, y D. Choudhary. *On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman - Monteith Equation*. 2nd National Conference on Information and Communication Technology (NCICT) 2011. Proceedings published in International Journal of Computer Applications® (IJCA). pp 22-25. Gondia, India. 2011.
27. P. Ponce Cruz. Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería. Editorial Alfa Omega. Primera edición. México. 2010.