

Controlador de riego basado en lógica difusa para el cultivo de manzanas

Manuel de Jesús Miranda Luna^a, José Antonio Martínez Rivera^b, Francisco Javier Godínez García^c, Eduardo Gamero Inda^d, Rubén Guerrero Rivera^e

^a Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango. C.P. 34080, mirlu8720@hotmail.com maestría en ingeniería, Durango, Dgo., México

^b Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango. C.P. 34080, jamartinez@itdurango.edu.mx maestría en ingeniería, Durango, Dgo., México

^c Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango. C.P. 34080, fgodinez@itdurango.edu.mx maestría en ingeniería, Durango, Dgo., México

^d Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango. C.P. 34080, egamero@itdurango.edu.mx maestría en ingeniería, Durango, Dgo., México

^e Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango. C.P. 34080, rubenguerrero@itdurango.edu.mx maestría en ingeniería, Durango, Dgo., México

Resumen

El agua es el factor más importante en la producción agrícola, el tiempo de irrigación, así como su distribución deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de cultivo y condiciones ambientales para obtener los mejores resultados, estos son los objetivos de un sistema de irrigación. Los cultivos de manzanas requieren de una irrigación especial bajo ciertas condiciones atmosféricas y terrestres. El presente artículo aborda el diseño, construcción e implementación de un controlador difuso para el control de un sistema de irrigación de un huerto de manzanas ubicado en Canatlán, Durango. En el diseño del controlador difuso, se definieron las variables de proceso del sistema de control y la fusificación de estas, el método de inferencia seleccionado fue tipo Mamdani y la defusificación por centro de gravedad. Se generó un conjunto de reglas IF-THEN que representan el conocimiento de un experto.

Palabras clave—irrigación, sistema embebido, lógica difusa.

Abstract

Water is the most important factor in agricultural production, irrigation time, as well as its distribution must be adjusted according to the type of crop and environmental conditions to obtain the best results, these are the objectives of an irrigation system. Apple crops require special irrigation under certain atmospheric and terrestrial conditions. This article deals with the design, construction, and implementation of a fuzzy controller to control an irrigation system for an apple orchard located in Canatlán, Durango. In the design of the fuzzy controller, the process variables of the control system and their fuzzyness were defined, the selected inference method was Mamdani type and defuzzification by center of gravity. A set of IF-THEN rules representing the knowledge of an expert was generated.

Keywords— embedded system, fuzzy logic, irrigation

1. INTRODUCCIÓN

La manzana es una de las especies de fruta dulce más conocida en todo el mundo y una de las de mayor valor económico, su demanda se acrecienta continuamente y con ello su cultivo, producción y comercio. México ocupa el decimotercer lugar en producción de manzana a nivel mundial según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura[1].

De acuerdo con los datos de 2017, esta fruta presentó una producción total de 714,149 toneladas, con un valor de 4.66 mil millones de pesos, en una superficie cosechada de 54,248 hectáreas en México. Del total de la producción nacional de manzana el estado de Chihuahua aportó 82.51% del volumen nacional recolectado, seguido por Puebla y Durango con 5.15% y 4.57%, respectivamente[2]. En particular, la fruticultura en el estado de Durango juega un papel importante para su desarrollo económico, de ahí el interés para aumentar los niveles de producción de la manzana. Durango es un estado que tiene las características necesarias para aumentar la producción de dicha fruta, ya que cuenta con varias regiones que son propicias para el crecimiento adecuado del fruto. Estos datos reflejan la importancia de optimizar su cultivo en las regiones en donde esta forma parte del potencial económico local, tomando en cuenta nuevas tecnologías que puedan incrementar la producción con calidad, reduciendo a la vez la huella de carbono y de consumo de recursos hídricos, dadas las nuevas tendencias globales de agricultura sustentable [3].

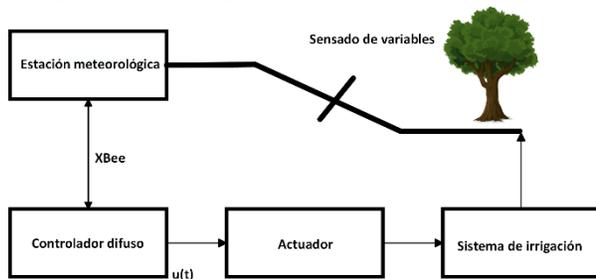
En este sentido, la optimización del riego en cultivos diversos, incluyendo la manzana, es uno de los tópicos más recurrentes en la investigación y desarrollo de tecnología agrícola y alimentaria. Por ejemplo, [4] reportan el diseño y pruebas de un sistema de irrigación automático para árboles frutales basado en las lecturas del flujo de savia en el tronco de los árboles. En otro trabajo [5], a partir de la recolección de datos como la humedad relativa, la temperatura del aire y del suelo, diseñaron un controlador de riego inalámbrico, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos. La propuesta consiste en un dispositivo controlador que puede ajustar automáticamente el tiempo de riego, el intervalo y algunos otros parámetros. Los resultados muestran un controlador confiable, fácil de operar, y que cumple con los requisitos de riego con alta precisión. Con respecto al dispositivo electrónico que funge como controlador de un sistema de irrigación, éste es el cerebro de todo un proceso cuyo objetivo es supervisar el flujo de agua para obtener los mejores resultados de la cosecha aplicando la mínima cantidad de agua [6]. Existen diversas posibilidades de arquitecturas electrónicas para la programación de dicho controlador, algunas con ciertas ventajas funcionales. En el desarrollo de un controlador difuso es posible prescindir de la rigidez matemática y transmitir el raciocinio humano a un sistema [7]. Esto es especialmente útil cuando los criterios de operación de un sistema están relacionados con datos esencialmente empíricos, como es el caso particular de la irrigación en los huertos de manzana en el estado de Durango, dado que se basa en el conocimiento experimental de sus productores. Por

tanto, el objetivo de este proyecto fue el diseño de un controlador difuso multivariable en un sistema embebido para la dosificación de riego aplicado al suelo del terreno agrícola de un huerto de manzanos, basado en la medición de variables con incertidumbre y la experiencia de sus productores.

2. CONTENIDO

El sistema de irrigación propuesto se divide en tres subsistemas: etapa de sensado y acondicionamiento de señales de interés: humedad relativa del suelo Hrs (%), humedad relativa del aire Hra (%), temperatura del suelo Ts (°C) y temperatura del aire Ta (°C), un controlador difuso y etapa de actuación. Cada uno de estos subsistemas posee un microcontrolador Microchip 16F4550 para el procesamiento de información. Estos subsistemas tienen la opción de alimentarse por energía solar o conectarse al suministro de la red de energía eléctrica. Entre estas etapas existe comunicación bidireccional mediante el uso de dispositivos DIGI XBee® S2C, visualizando la información mediante pantallas LCD de 1602 caracteres, figura 1.

Figura 1. Esquema general del sistema de control difuso



2.1 Controlador difuso

Un controlador difuso se divide en cuatro partes: 1) un fusificador que convierte las entradas en valores difusos, 2) una base de reglas lingüísticas que representa el conocimiento necesario para controlar la planta mediante lógica difusa, 3) un mecanismo de inferencia que determina cual es la mejor acción en función del estado actual y de la información almacenada en la base de reglas, y 4) un defusificador que transforma el resultado del mecanismo de inferencia en una acción de control [8]. Dentro del controlador las reglas se comparan con las variables difusas. Este proceso de interrelación involucra determinar qué tan cierto una regla aplica a las condiciones actuales, y el conjunto de reglas activadas es la entrada del proceso de inferencia Mamdani. Su salida es el conjunto de funciones de membresía de salida que representan las conclusiones alcanzadas de manera independiente por cada una de las reglas. Las variables de entrada al controlador difuso son, humedad relativa del suelo Hrs (%), humedad relativa del aire Hra (%), temperatura del suelo Ts (°C) y temperatura del aire Ta (°C), cada una conformada por tres conjuntos difusos con su respectiva etiqueta lingüística. Al tener cuatro entradas y cada una de ellas con tres conjuntos difusos, el número total de reglas posibles es 81, de estas, 54 fueron definidas por el humano

experto, las restantes fueron consideradas para tener un efecto de salida de válvula cerrada.

2.1.1 Fusificación

Las mediciones de humedad relativa del suelo Hrs (%), humedad relativa del aire Hra (%), temperatura del suelo Ts (°C) y temperatura del aire Ta (°C), fueron convertidas en valores difusos, determinando el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos borrosos a través de funciones de pertenencia de triángulos equiláteros, tabla 1.

Tabla 1. Representación matemática de una función de membresía triangular.

Función de pertenencia		Intervalo de aproximación
A(x)	$\alpha\left(\frac{x-a}{c-a}\right)$	Si $a \leq x \leq c$
	$\alpha\left(\frac{x-b}{c-b}\right)$	Si $c \leq x \leq b$
	0	Valor fuera de rango

La Ec. 1 permite calcular el área bajo la función de membresía de salida ($\int \mu_{(i)}$) de las reglas activadas por las condiciones atmosféricas predominantes. Las funciones de salida están conformadas de un grupo de triángulos isósceles con ancho de base (w) y una altura de corte (h).

$$\int M_{(i)} = w\left(h - \frac{h^2}{2}\right) \quad \text{Ec. 1}$$

El valor que se obtiene de la Ec. 1, representa un valor de fuerza de disparo de la regla, en función de las condiciones actuales del estado del sistema.

Dentro del controlador las reglas se comparan con las variables difusas. Este proceso de interrelación involucra determinar qué tan cierto una regla aplica a las condiciones actuales, y el conjunto de reglas activadas es la entrada del proceso de inferencia Mamdani. Su salida es el conjunto de funciones de membresía de salida que representan las conclusiones alcanzadas de manera independiente por cada una de las reglas.

La información histórica de operación permitió definir tres conjuntos difusos, así como las etiquetas lingüísticas para cada una de las cuatro variables de interés, tabla 2.

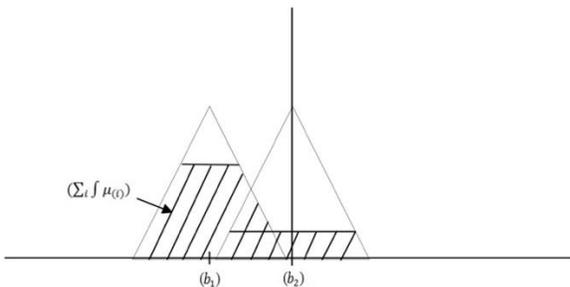
Tabla 2. Partición de las variables de entrada

Variables de entrada			
Hrs (%)	Hra (%)	Ts (°C)	Ta (°C)
PocaHumedad Hrs < 40%	PocaHumedad Hra < 40%	Frio Ts < 3°C	Frio Ta < 10°C
Normal 20% ≤ Hrs ≤ 60%	Normal 20% ≤ Hra ≤ 60%	Normal 0°C ≤ Ts ≤ 6°C	Templado 0°C ≤ Ta ≤ 20°C
MuchaHumedad Hrs > 40%	MuchaHumedad Hra > 40%	Caliente Ts > 3°C	Caliente Ta > 10°C

2.1.2 Defusificación

La salida del controlador difuso fue obtenida mediante una operación denominada defusificación, que opera sobre los conjuntos difusos implicados en el mecanismo de inferencia y suma sus efectos para proporcionar la señal de actuación a la entrada de la planta, para este proyecto el método de defusificación que se escogió fue el centro de gravedad (COG). La Ec. 2 determina el centro de gravedad (COG) resultante de la relación de la sumatoria de las reglas activadas ($\sum_i \int \mu_{(i)}$), por el centro de la base del conjunto difuso (b_i) entre la sumatoria de las reglas activadas, Figura 2.

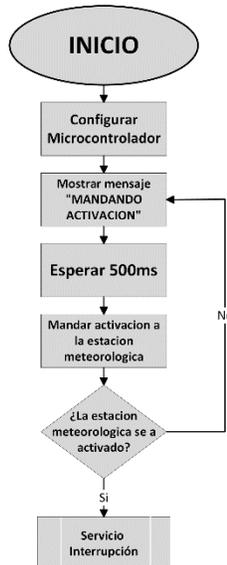
Figura 2. Defusificación por centro de gravedad.



El método COG determina el centro de gravedad del área de la función de membresía proporcionada por el método de inferencia tipo Mamdani. Las propiedades principales de este método son su robustez en la salida ante pequeños cambios en las entradas, y su salida representada con un valor único como resultado de la operación.

Mediante herramientas computacionales se simuló la fusificación de las variables de interés, reglas difusas, el método de inferencia y la salida continua, validado el funcionamiento del controlador difuso se desarrolló el algoritmo de control, figura 3.

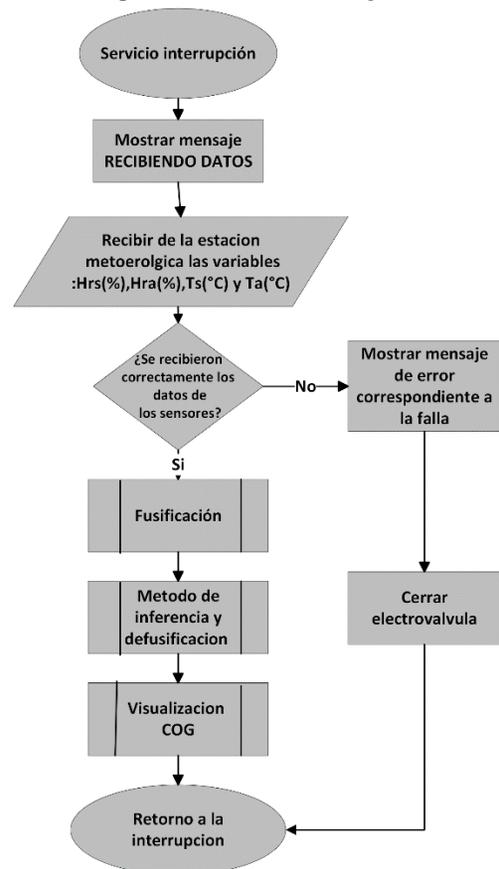
Figura 3. Inicialización del sistema de riego.



La figura 3 muestra el diagrama de flujo para la inicialización del sistema de riego, se define tipo y frecuencia del oscilador del microcontrolador, se habilita el watchdog, la interrupción global, interrupción RS232 y la pantalla LCD. Para evitar que el microcontrolador se reinicie se restablece el watchdog después la pantalla LCD muestra el mensaje “MANDANDO ACTIVACION” y se produce un retardo de 500ms con el objetivo de asegurar que la estación meteorológica este encendida. Posteriormente se envía una señal a la estación meteorológica con el objetivo de activarla e iniciar la recepción de las variables utilizadas en el sistema de control, si la estación no responde el microcontrolador se cicla hasta que reciba una respuesta positiva por parte de la estación meteorológica.

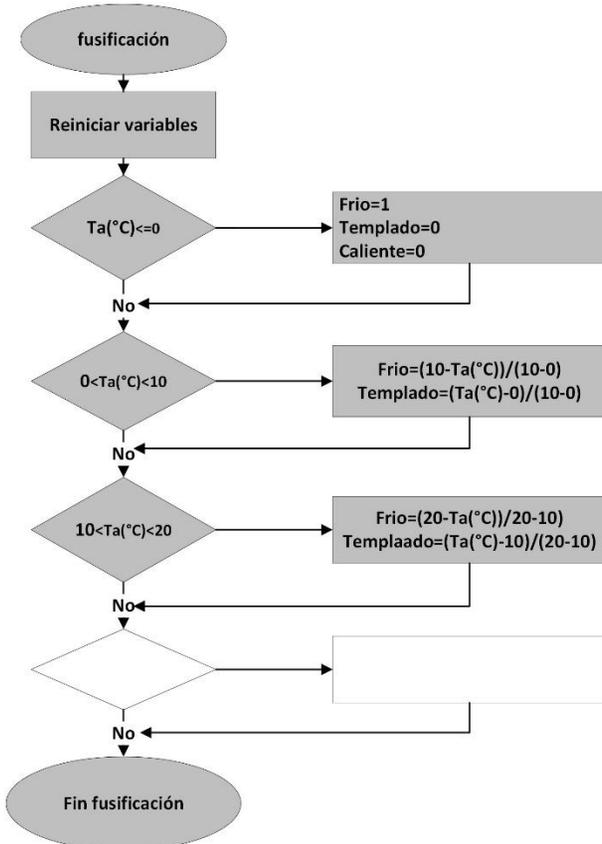
Una vez recibida la interrupción lo cual significa que la estación meteorológica se encuentra en operación, el controlador difuso muestra el mensaje “RECIBIENDO DATOS”, empieza a recibir datos de la estación meteorológica por medio de dispositivos Xbee de las variables Hrs(%), Hra(%), Ts(°C) y Ta (°C) estas son almacenadas en la memoria del microcontrolador, fusificadas y aplicadas en el método de inferencia Mamdani, para después obtener el centro de gravedad. Estos procesos se encuentran definidos en las subrutinas “Fusificación”, “Método de inferencia y defusificación” y “Visualización COG”, al finalizar estas subrutinas el microcontrolador regresa al ciclo principal del programa, figura 4.

Figura 4. Servicio de interrupción



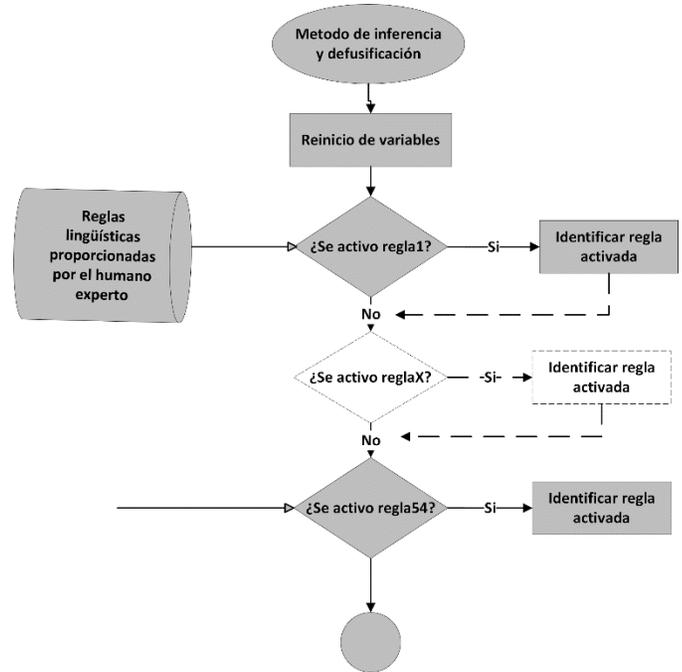
Se muestra el proceso de fusificación de la variable Ta, la fusificación de las variables restantes sigue un proceso similar. Se restablecen los valores de las etiquetas lingüísticas que intervienen en la subrutina de “Fusificación”, si Ta es menor o igual que 0°C, significa que el valor difuso de la etiqueta Frio es igual a uno, de la etiqueta Templado es igual a cero y la etiqueta Caliente es igual a cero, si Ta cae dentro del rango de 0°C a 10°C, se aplica la formula indicada en el diagrama de flujo. El objetivo de esta subrutina es definir el valor difuso para las etiquetas lingüísticas de las variables Hrs (%), Hra(%), Ts(°C) y Ta (°C), figura 5.

Figura 5. Fusificación de la variable Ta.



Una vez fusificadas las variables de entrada, es preciso utilizar el método de inferencia tipo Mamdani, para posteriormente defusificar la función de membresía de salida entregada por el método de inferencia. Se aplica el método de inferencia tipo Mamdani, se requiere identificar cuantas y cuales reglas lingüísticas proporcionadas por el humano experto y que forman la base de datos están activadas de acuerdo con las condiciones atmosféricas actuales en el huerto de manzanos, figura 6.

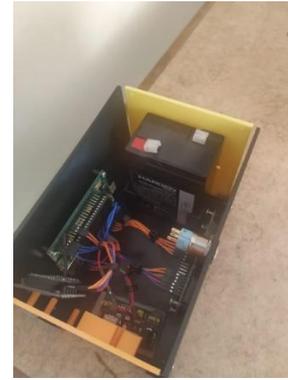
Figura 6. Método de inferencia y fusificación.



2.2 Implementación física del sistema

En el prototipo del sistema del controlador difuso se observan los diferentes dispositivos como: el microcontrolador que contiene el algoritmo de control difuso, la pantalla LCD donde se exhiben los valores de las variables de entrada así como el centro de gravedad calculado, la placa y la batería de alimentación para energizar los diferentes componentes y un dispositivo Xbee 2SC que permite una comunicación serial con los demás subsistemas, así como las diferentes conexiones entre estos componentes, figura 7.

Figura 7. Sistema embebido del controlador difuso



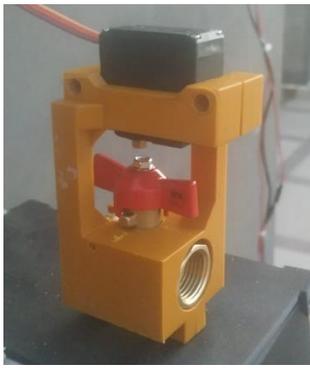
La integración de los subsistemas, etapa de sensado y acondicionamiento de señales de interés, controlador difuso y etapa de actuación permiten la conexión al sistema de irrigación, figura 8.

Figura 8. Etapa de sensado y etapa de actuación.



El actuador del sistema de control se compone de un motor a pasos y una válvula insertados en una base elaborada en un programa de diseño mecánico y fabricada en una impresora 3D, permite girar el vástago de la válvula de acuerdo al valor del centro de gravedad enviado por el controlador difuso, figura 9.

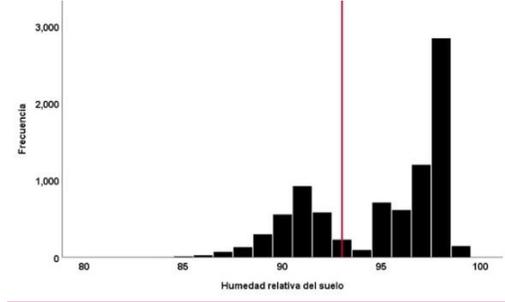
Figura 9. Electroválvula.



2.3 Análisis de resultados

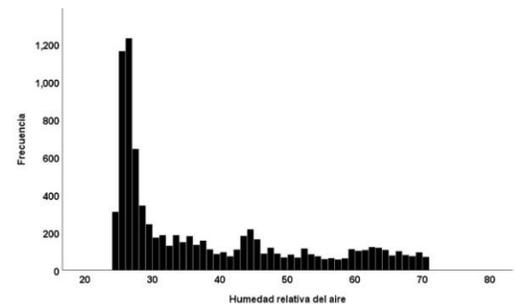
Para el análisis estadístico del comportamiento del sistema de control de irrigación se generó una base de datos compuesta por las mediciones de las cuatro variables de interés, donde Hrs (%) representa la variable dependiente o respuesta, mientras que Hra (%), Ta (°C) y Ts (°C) representan variables independientes. El histograma de los datos de Hrs (%) donde se distinguen dos distribuciones que indican diferentes dinámicas del comportamiento de la variable; La primer distribución corresponde a la condición previa a la aplicación de la acción de control y se caracterizó por valores menores de humedad, mientras que la segunda distribución es posterior a la implementación del controlador difuso, el cual incrementó los valores de humedad del suelo. Para distinguir ambas acciones de control se implementó el algoritmo de separación de Otsu, el valor de separación de Otsu para Hrs (%) es de 93% indicado por la línea vertical roja, figura 10.

Figura 10. Histograma de distribución de los porcentajes de humedad del suelo

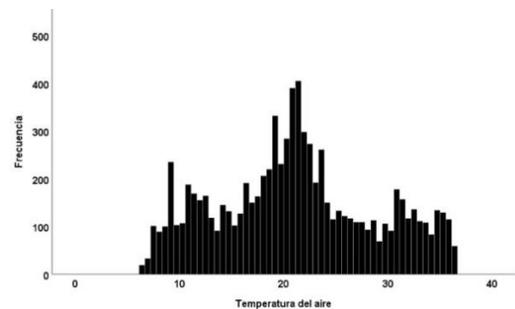


Por otro lado, las variables independientes muestran los siguientes comportamientos: Hra (%) registró lecturas de valores menores al 40% de humedad, debido a la escasa presencia de lluvias en las fechas en que se realizaron las mediciones, figura 11a. La temperatura ambiente registró una distribución trimodal, correspondiente a las mediciones nocturnas, diurnas y vespertinas, figura 11b. La temperatura del suelo presentó una distribución bimodal, en donde la primera se caracterizó por valores de temperaturas de aproximadamente 18°C, en tanto que en la segunda distribución la temperatura se incrementó por encima de los 19°C, figura 11c.

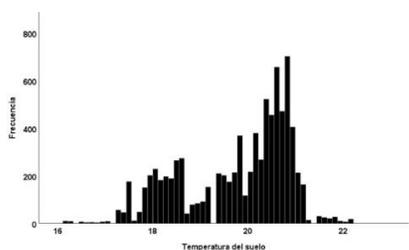
Figura 11. Histogramas de distribución de las mediciones de las variables independientes: a) Humedad relativa del aire, b) Temperatura del aire, c) Temperatura del suelo.



a)



b)



c)

En las características de los dos grupos para determinar la acción de control, destacan las variables Hrs (%) y Hra (%), cuyas diferencias en los promedios son mayores para el grupo donde la acción de control está presente 97.15% y 39.49% respectivamente en contraste con el grupo donde la acción de control no está presente 90.65% y 34.88%. La diferencia de promedios de las variables Ta (°C) y Ts (°C) son del orden de un punto porcentual entre ambos grupos, sin embargo, destaca Ts(°C) en el grupo de acción de control presente, al tener un rango de temperaturas entre 16.2°C y 21.3°C, contra temperaturas de 19°C y 22°C cuando la acción de control no está siendo aplicada, tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las variables medidas según acción de control.

Acción de control	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
NO				
Hrs(%)	84	93	90.65	1.49
Hra(%)	24.61	70.74	34.88	14.33
Ta(°C)	6.54	36.33	20.59	7.67
Ts(°C)	18.98	22.15	20.57	0.51
SI				
Hrs(%)	94	99	97.15	1.16
Hra(%)	24.61	70.74	39.49	13.35
Ta(°C)	6.45	36.33	21.43	7.48
Ts(°C)	16.17	21.33	19.39	1.16

La variable Hrs (%) es la variable afectada por la acción de control al incrementarse de 90.65% al 97.15% de humedad. Esto es el resultado del encendido del actuador que el sistema controla para mantener Hrs (%) dentro de los valores establecidos en la base de reglas lingüísticas definida por el experto en irrigación, tabla 4.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos por grupos según acción de control.

Acción de control	Variable	Promedio	Desviación Estándar
NO	Hra(%)	34.88	14.33
	Ta(°C)	20.59	7.67
	Ts(°C)	20.57	0.51
SI	Hra(%)	39.49	13.35
	Ta(°C)	21.43	7.48
	Ts(°C)	19.39	1.16
Total	Hra(%)	37.95	13.86
	Ta(°C)	21.15	7.55
	Ts(°C)	19.78	1.14

Por su parte, Hra (%) registró un promedio de 39.5% durante la acción de control que previo a este fue de 34.9%, en tanto que Ts (°C) registró valores menores cuando se aplicó la acción de control. Para determinar la existencia de un espacio de separación de las respuestas de las variables previas a la acción de control y una vez aplicado la acción de control, se realizó un análisis discriminante.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La medición de variables climatológicas, humedad relativa del aire Hra (%), temperatura del aire Ta (°C), temperatura del suelo Ts (°C) y humedad relativa del suelo Hrs (%) en conjunto con una base de reglas lingüísticas generadas a partir del conocimiento empírico de un experto en irrigación, permitió el diseño de un algoritmo de control basado en lógica difusa el cual se implementó en un microcontrolador de gama media. El sistema de control a lazo cerrado aplicado al sistema de riego permite sustituir el sistema de riego por agua rodada por un sistema de riego de precisión. En versiones futuras del prototipo, se plantea usar dispositivos de comunicación LoRA para mejorar la comunicación entre la estación meteorológica y el controlador difuso. Así mismo, los PCBs del prototipo de una sola capa serán sustituidos por PCBs de dos capas para la reducción de las dimensiones físicas. El sensor de la humedad del suelo de la estación meteorológica en futuras versiones será sustituido por un sensor más robusto.

4. REFERENCIAS

- [1] FAO. "Cultivos y productos de ganadería". Recuperado el 6 de abril de 2020, de <http://www.fao.org/faostat/es/?#data/QC>
- [2] SAGARPA. "Atlas Agroalimentario 2018". Gobierno de México. Recuperado el 6 de Abril de 2020, de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018
- [3] Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Batlles-delaFuente, A., & Fidelibus, M. D. "Sustainable Irrigation in Agriculture: An Analysis of Global Research". Water, 11(9), 1758. <https://doi.org/10.3390/w11091758>, 2019
- [4] Fernández, J., Romero, R., Montaña, J., Diaz-Espejo, A., Muriel, J., Cuevas, M., et al. "Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree. Australian Journal of Agricultural Research", pp. 589–598, 2008.
- [5] Hu, F., Chen, C., & Li, X. "Design of Wireless Water-Saving Irrigation Controller. Applied Mechanics and Materials", pp. 1577-1580, 2013.
- [6] M. Bahat, G. I. (2000). "A fuzzy irrigation controller system. Engineering Applications of Arti@cial Intelligence", pp.13, 137-145, 2000.
- [7] Delgado-Aguíñaga, J. A., Orozco-Mora, J. L., & Ruiz-Beltrán, E. "Solución al problema de desacoplamiento mediante un controlador. Ingeniería Investigación y Tecnología", pp. 523-536, 2013.
- [8] Theler, G. "Controladores basados en lógica difusa y loops de convencion natural caoticos". Instituto Balseiro. Universidad Nacional de Cuyo. Comision Nacional de Energia Atomica., pp. 1-171, 2007.