



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE RIEGO POR GOTEO”

IVÁN MOISÉS LEMA HOLGUÍN

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,
como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

Enero 2018

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE RIEGO POR GOTEO", de responsabilidad del Ing. Iván Moisés Lema Holguín, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Juan Mario Vargas Guambo, M. Sc.

PRESIDENTE

Ing. Víctor Hugo Andaluz Ortiz, Ph. D.

DIRECTOR DE TESIS

Ing. David Raimundo Rivas Lalaleo, M. Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Milton Fabricio Pérez Gutiérrez, M. Sc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, Enero 2018

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Iván Moisés Lema Holguín, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

IVÁN MOISÉS LEMA HOLGUÍN

Nº Cédula: 172131803-6

@2018, Iván Moisés Lema Holguín

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Iván Moisés Lema Holguín, declaro que el presente Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

IVÁN MOISÉS LEMA HOLGUÍN

Nº Cédula: 172131803-6

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi Familia que han estado conmigo apoyándome y ayudándome en cada momento de mi vida, han estado pendiente de mi, que me han dado el ejemplo de siempre seguir adelante sin detenerme ante cualquier problema o tropiezo.

A mi amiga y compañera que siempre ha estado conmigo durante muchos años de mi vida, Jessica siempre has estado conmigo en las buenas y en las malas en cada parte importante o no de mi vida, siempre apoyándome incondicionalmente, te dedico este trabajo, porque fuiste parte de él.

Iván

AGRADECIMIENTO

Agradezco este trabajo a Dios, ya que me ha estado en todo momento de mi vida cuidándome y protegiéndome frente a cada problema.

Doy mi eterno agradecimiento a toda la familia BEDON, que ha estado siempre pendiente en ayudarme en este proyecto, que me ha dado un lugar para poder realizar este trabajo de titulación.

Iván

CONTENIDO

RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
CAPITULO I	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1 <i>Situación Problemática.</i>	1
1.1.2 <i>Formulación del Problema.</i>	2
1.1.3 <i>Preguntas directrices o específicas.</i>	2
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivo	3
1.3.1 <i>Objetivo General.</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos Específicos.</i>	3
1.4 Hipótesis	4
1.4.1 <i>Hipótesis General</i>	4
1.4.2 <i>Hipótesis Específicas.</i>	4
CAPITULO II	
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Agricultura Hidropónica	5
2.1.1 <i>Hidroponía</i>	5
2.1.2 <i>Ventajas de la Hidroponía</i>	5
2.1.3 <i>Desventajas de la hidroponía</i>	6
2.1.4 <i>Requerimientos del sistema del cultivo hidropónico.</i>	6
2.1.4.1 <i>Localización</i>	7
2.1.4.2 <i>Invernaderos</i>	7
2.1.4.3 <i>Agua para riego</i>	11
2.1.4.4 <i>Solución Nutritiva</i>	11
2.1.4.5 <i>Sustrato</i>	12
2.1.4.6 <i>Contenedores</i>	14
2.1.4.7 <i>Material Vegetal a cultivar</i>	14
2.1.4.8 <i>Sistema de Control del cultivo hidropónico</i>	15
2.2 Riego por Goteo	16
2.2.1 <i>Ventajas del riego por goteo</i>	17
2.2.2 <i>Componentes del sistema de riego por goteo</i>	17
2.2.3 <i>Fertirrigación</i>	18
2.3 Control Fuzzy	18
2.3.1 <i>Lógica Difusa</i>	18
2.3.2 <i>Operaciones entre relaciones difusas.</i>	19
2.3.3 <i>Funciones de pertenencia:</i>	20
2.3.4 <i>Controladores difusos</i>	22
2.3.4.1 <i>Interfaz de difusificación.</i>	23
2.3.4.2 <i>Base de conocimientos</i>	23
2.3.4.3 <i>Lógica de decisiones</i>	24
2.3.4.4 <i>Interfaz de desdifusificación.</i>	24
2.3.5 <i>Sistemas de control con Lógica Fuzzy</i>	26
2.3.5.1 <i>Tipos de controladores difusos por el motor de interferencia</i>	26
2.3.5.2 <i>Arquitecturas de control difuso</i>	29
2.4 Cultivo del Tomate Riñón Variedad Daniela.....	30

2.4.1	<i>Etapas fenológicas de la planta de Tomate Riñón</i>	30
2.4.2	<i>Desordenes Fisiológicos para tomate bajo invernadero</i>	31

CAPITULO III

3.	CONTROL DE RIEGO POR GOTEO BASADO EL AGRICULTURA HIDROPÓNICA	33
3.1	Tipo y Dimensiones del Invernadero	33
3.2	Tipo de Cultivo	34
3.3	Dimensiones del Contenedor y Tipo de Sustrato	35
3.4	Nutrientes	36
3.4.1	<i>Nutrientes para el establecimiento de las plantas</i>	37
3.4.2	<i>Nutrientes para el crecimiento Vegetativo</i>	38
3.4.3	<i>Nutrientes para la floración y cuaja</i>	38
3.4.4	<i>Nutrientes para el desarrollo de la fruta</i>	39
3.4.5	<i>Nutrientes para la madurez fisiológica y cosecha</i>	40
3.5	Diseño e Implementación del Sistema de Riego por Goteo	40
3.5.1	<i>Componentes de sistemas de riego por goteo implementado</i>	41
3.5.2	<i>Características de los equipos principales del sistema de riego por goteo implementado</i>	42
3.5.2.1	<i>Electroválvulas - BERMAD SERIE 200</i>	42
3.5.2.2	<i>Bomba de agua – MILANO QB-60</i>	43
3.5.2.3	<i>Goterros Integrados</i>	43
3.6	Diseño e Implementación del Control Automático de Riego por Goteo	44
3.6.1	<i>Diseño de control del sistema de riego por goteo</i>	44
3.6.2	<i>Diseño del sistema de comunicación entre equipos e instrumentos</i>	46
3.6.3	<i>Selección de equipos e instrumentos</i>	47
3.6.3.1	<i>Tarjeta de Control – Arduino MEGA</i>	47
3.6.3.2	<i>Tarjeta de Comunicación – Arduino Leonardo con Ethernet Shield</i>	48
3.6.3.3	<i>Transmisor y sensor de temperatura – Sensor Digital de Temperatura DS18B20</i>	49
3.6.3.4	<i>Transmisor y Sensor de Humedad – Sensor YL-69 Y Conversor YL-38</i>	50
3.6.3.5	<i>Transmisor y sensor de pH – Sensor de pH-BTA Vernier</i>	51
3.6.3.6	<i>Transmisor y Sensor de Conductividad Eléctrica – Sensor Con-BTA de Vernier</i>	52
3.6.4	<i>Diseño de la arquitectura del sistema de control</i>	53
3.6.5	<i>Diseño del Controlador Difuso</i>	55
3.6.5.1	<i>Diseño de las funciones de membresía</i>	56
3.6.5.2	<i>Creación de las bases de reglas</i>	60
3.6.5.3	<i>Defusificación</i>	63
3.6.6	<i>Diseño e Implementación de una Interfaz Hombre-Máquina</i>	64
3.6.7	<i>Diseño e Implementación de una Base de Datos</i>	66
3.6.8	<i>Implementación del sistema de control</i>	68

CAPITULO IV

4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS	72
4.1.	Resultados y Análisis	72
4.2	Trabajos Futuros	81

CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2	Roles principales de los nutrientes.....	12
Tabla 2-2	Temperaturas críticas para el cultivo de tomate	15
Tabla 3-2	Resumen de los mecanismos de interferencia	29
Tabla 1.3	Variables de medidas óptimas para el cultivo de tomate.....	35
Tabla 2-3	Macronutrientes y micronutrientes del SOLUCAT 25-5-5.....	37
Tabla 3-3	Macronutrientes y micronutrientes del MINERAGOLD 10-52-10 +ME.....	38
Tabla 4-3	Macronutrientes y micronutrientes del MINERAGOLD 10-10-40 +ME.....	39
Tabla 5-3	Macronutrientes y micronutrientes del INNUTRI 20-20-20	40
Tabla 6-3	Hoja de datos de Arduino MEGA.....	48
Tabla 7-3	Hoja de datos de arduino Leonardo.....	49
Tabla 8-3	Variables de entrada óptima del sistema	55
Tabla 9-3	Descripción de los conjuntos difusos del error de temperatura del sustrato.....	56
Tabla 10-3	Descripción de los conjuntos difusos del error de humedad del sustrato.....	57
Tabla 11-3	Definición de los conjuntos difusos de Regar agua	57
Tabla 12-3	Definición de los conjuntos difusos de error de pH del sustrato.	58
Tabla 13-3	Definición de los conjuntos difusos de error de conductividad eléctrica del sustrato.	58
Tabla 14-3	Definición de los conjuntos difusos de regar nutriente	59
Tabla 15-3	Tabla de reglas difusas para la salida de control KC-01	60
Tabla 16-3	Tabla de reglas difusas para la salida de control KC-02	62
Tabla 1-4	Análisis de los datos del controlador de diseño 1 en 900 segundos.....	73
Tabla 2-4	Análisis de los datos del controlador de diseño 2 en 480 segundos.....	76
Tabla 3-4	Errores de las variables de entrada.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2	Orientación recomendada de los invernaderos.....	8
Figura 2-2	Invernadero tipo túnel.	9
Figura 3-2	Invernadero tipo parral.....	9
Figura 4-2	Invernadero Tipo Asimétrico	10
Figura 5-2	Invernadero Tipo Capilla	10
Figura 6-2	Componentes del sistema de riego por goteo.....	18
Figura 7-2	Estructura de un controlador difuso.....	23
Figura 8-2	Controlador Difuso Clásico.....	26
Figura 9-2	Estructura básica de la interferencia Mandami	27
Figura 10-2	Estructura básica de interferencia de Takagi, Sugeno y Kang.....	28
Figura 11-2	Fenología del cultivo del tomate riñón.	31
Figura 1-3	Ubicación geográfica del invernadero	33
Figura 2-3	Vista lateral y superior del invernadero tipo túnel construido.	34
Figura 3-3	Sistema de riego por goteo implementado	41
Figura 4-3	Funcionamiento de las electroválvulas.	42
Figura 5-3	Bomba de agua	43
Figura 6-3	Goteros integrados	43
Figura 7-3	Diagrama P&ID del sistema de riego por goteo implementado.....	45
Figura 8-3	Diagrama de comunicaciones del sistema de control de riego por goteo.	46
Figura 9-3	Arduino MEGA	47
Figura 10-3	Arduino Leonardo.....	48
Figura 11-3	Ethernet Shield	49
Figura 12-3	Sensor de temperatura DS18B20.....	50
Figura 13-3	Sensor de humedad YL-69.....	51
Figura 14-3	Convertor de sensor de humedad YL-38.....	51
Figura 15-3	Sensor de pH	52
Figura 16-3	Sensor de conductividad eléctrica	52
Figura 17-3	Arquitectura de control para el sistema de riego por goteo	53
Figura 18-3	Diagrama de flujo del sistema de control de riego por goteo.....	54
Figura 19-3	Pantalla principal del proceso del Cultivo de Tomate Riñón Variedad Daniela.....	64
Figura 20-3	Pantallas de Visualización de variables del sustrato.....	65
Figura 21-3	Configuración de los parámetros de comunicación del HMI y la tarjeta de control.....	65
Figura 22-3	Configuración de los registros de comunicación del HMI y la tarjeta de control.	66
Figura 23-3	Panel de control del XAMP	67
Figura 24-3	Base de datos implementado en phpMyAdmin.....	67
Figura 25-3	Programa para almacenar en la base de datos.	68
Figura 26-3	Muestra de los datos de proceso en Modscan	70
Figura 27-3	Visualización de los datos de proceso a través de la red	71

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-1	Cultivo hidropónico de Tomate Riñón Variedad Daniela	5
Fotografía 2-2	Invernadero tipo túnel para el cultivo hidropónico.	7
Fotografía 3-2	Cultivo de tomate con stress hídrico	11
Fotografía 4-2	Sustrato Peat moss	13
Fotografía 5-2	Sustrato Cascarilla de Arroz	13
Fotografía 6-2	Contenedores de plástico con sustrato	14
Fotografía 7-2	Siembra por trasplante en sustrato de tomate riñón.	14
Fotografía 8-2	Riego por goteo del cultivo de tomate riñón.....	17
Fotografía 1-3	Totoreo de la planta de Tomate.....	35
Fotografía 2-3	Colocación del nutriente sobre contenedor.....	36
Fotografía 3-3	Transplante de plantas de tomate	37
Fotografía 4-3	Floración de la planta de tomate	38
Fotografía 5-3	Desarrollo de la fruta de la planta de tomate	39
Fotografía 6-3	Extracción del agua para riego	40
Fotografía 1-4	Medición de temperatura del sustrato.....	72
Fotografía 2-4	Medición del pH del Nutriente.....	75

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1-2 Representación del conjunto difuso de temperatura del sustrato.....	19
Gráfica 2-2 Función de saturación.....	21
Gráfica 3-2 Función hombro	21
Gráfica 4-2 Función Triangular.....	21
Gráfica 5-2 Función Trapecio o Pi.	22
Gráfica 6-2 Función Sigmoidal	22
Gráfica 7-2 Particiones difusas con distintos números de términos.	23
Gráfica 8-2 a) Conjuntos recortados y b) Conjuntos escalados	24
Gráfica 9-2 Corte de la función de membresía.....	25
Gráfica 1-3 Funciones de pertenencia del error de temperatura y error de humedad	57
Gráfica 2-3 Funciones de pertenencia de regar agua.....	58
Gráfica 3-3 Funciones de pertenencia de error de pH y conductividad eléctrica del sustrato.....	59
Gráfica 4-3 Funciones de pertenencia de regar sustrato.	60
Gráfica 5-3 Defusificación de las variables de entrada de controlador difuso 1 y 2.	63
Gráfica 6-3 Superficie de control de regar agua y regar nutriente	64
Gráfica 7-3 Tiempos de salida de los controladores de diseño.	71
Gráfica 1-4 Muestra de datos del controlador de diseño 1 en 900 segundos.....	73
Gráfica 2-4 Defusificación de las entradas con el controlador de diseño 1.....	74
Gráfica 3-4 Muestra de datos del controlador de diseño 2 en 480 segundos.....	75
Gráfica 4-4 Defusificación de las entradas con el controlador de diseño 2.....	76
Gráfica 5-4 Riego de agua vs temperatura & humedad.....	77
Gráfica 6-4 Riego de nutriente vs pH & Conductividad Eléctrica.....	78
Gráfica 7-4 Temperatura ambiente vs Temperatura del sustrato	79
Gráfica 8-4 Conductividad Eléctrica vs Riego.....	80

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el cultivo del tomate riñón variedad Daniela basado en agricultura hidropónica mediante un sistema automático de riego por goteo con control fuzzy. Se definió las variables de entrada (temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica del sustrato) y salida (agua de riego, solución nutritiva); para estudiar las características técnicas de los sensores y actuadores usados en estos sistemas; con el fin de monitorear y experimentar los cambios de las variables, conocer la eficiencia del controlador frente a las perturbaciones del ambiente y necesidades fisiológicas del cultivo. En la implementación se obtuvo los datos necesarios para conocer si el controlador difuso es óptimo o no. Con la experimentación se modificó las reglas de control fuzzy para obtener una mejor respuesta al sistema. El diseño determinó que el tipo de controlador es de lazo cerrado con control proporcional mediante un motor de interferencia basado en el algoritmo Mandami. Los resultados obtenidos son: consumo de litros de agua 135 litros/día y nutriente 40 litros/día promedio en un cultivo de 144 plantas; los diámetros de los tomates varían desde 3 ½” a 4” en su primera cosecha a las 11 semanas después del trasplante. La recolección de datos permitió conocer los siguientes valores de moda en el error de: temperatura +0.38°C, humedad -1.8%, pH +1 unidad, conductividad eléctrica de -588 uS/cm. Concluyendo que mediante un controlador basado en lógica difusa permite que el riego de solución nutritiva o agua sea en la cantidad y en el tiempo que la planta lo requiere; de esta forma teniendo frutos de mayor diámetro y jugosos en un menor tiempo en comparación a otros cultivos; y así manejar las variables de medida dentro de los rangos de error óptimos. Se recomienda que el tanque de fertilización tenga un sistema de recirculación para no permitir el asentamiento de las sales nutritivas.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIA DE LA INGENIERÍA>; <CONTROL AUTOMÁTICO>; <RIEGO POR GOTEO>; <LÓGICA DIFUSA>; <CONTROL DIFUSO>; <MOTOR DE INTERFERENCIA DIFUSA>

SUMMARY

This research had as objective the cultivation of Daniela variety tomato based on the hydroponic agriculture through an automatic drip irrigation system fuzzy control. The input variable was defined (temperature, humidity, Ph, electric conductivity of the substrate) and output (irrigation water, nutrient solution) to study the technical characteristics of sensors and actuators used in these systems; with the aim of monitoring and experiment the changes of the variables, to know the efficiency of the efficiency of the controller against the disturbance of the environment and physiological needs of the crop. Relevant data were obtained to know if the fuzzy controller is optimal or not. The fuzzy control rules were modified with the experimentation to get a better system responsiveness. The design determined that the type of controller is of a closed loop with proportional control through an interference engine based on the Mandami algorithm. The obtained results were: Water consumption per liters 135 liters/day and nutrient 40 liters/day average in a crop of 144 plants; the diameters of the tomatoes vary from 3 1/2" a 4" in its first harvest on the 11 weeks after transplantation. The data collection allows knowing the following mode values in the error of temperature +0.38°C, humidity -1.8%, pH +1 unit, the electric conductivity of -588 uS/cm. Concluding that through a controller based on fuzzy logic allows that the irrigation of nutrient solution or water will be in the quantity and in the time that the plant requires; obtaining in this way products with larger diameter and juicy in less time comparing with other crops; and thus manage the measurement variables within the range of optimal errors. It is recommended that the fertilizer tank has a recirculation system to not allow the nutrient salts settlement.

Keywords: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>; <AUTOMATIC CONTROL;>
<DRIP IRRIGATION>; <FUZZY LOGIC>; <FUZZY CONTROL>; <FUZZY INTERFERENCE
ENGINE>

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 *Situación Problemática.*

La tasa de crecimiento de la producción agropecuaria a nivel mundial ha disminuido en los últimos años, por lo que existe la desconfianza de poder suministrar la producción de alimentos para la futura población mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015). El cambio climático a nivel mundial ha provocado fenómenos naturales cada vez más prolongados y frecuentes como olas de calor, sequía, subidas del nivel del mar, inundaciones; por lo que la agricultura debe tomar medidas para aumentar su sostenibilidad y la productividad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016).

En Ecuador el 19% del territorio nacional es para uso agropecuario, que correspondió para el año 2016 la cantidad de 4.872.049,88 hectáreas. Debido a factores naturales y antrópicos se perdieron el 3.38% de la superficie agropecuaria, 164.742,23 hectáreas. La superficie agropecuaria que cuenta con riego es de 989.637,67 ha., y la superficie potencialmente regable es de 3.136.000 ha. Los tipos de riegos más utilizados en nuestro país son surcos-inundación, aspersión, goteo, entre otros; donde el riego por goteo es más usado en la floricultura (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2015).

La principal fuente de empleo en nuestro país es la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, ya que representa el 28.6% de la población económicamente activa (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2017). Los principales cultivos del país son Cacao, Maíz, Arroz, Palma de aceite, y café. Mientras los productos para exportación son: Banano, crustáceos congelados, pescado preparado y flores cortadas (Montoya, 2016).

La tecnología a través de estos últimos años ha tenido un avance considerable como: la siembra directa, agroquímicos, biotecnología, agricultura de precisión (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016). La siembra directa es sembrar sin laborear, sobre suelo preparado mediante procesos biológicos que produce un entorno adecuado (Perrachón, 2004); los agroquímicos componen los fertilizantes y plaguicidas; la biotecnología se refiere al mejoramiento genético de plantas y animales para aumentar

su rendimiento y eficiencia, entre otras aplicaciones; la agricultura de precisión es el manejo adecuado de la cantidad insumos en el momento y lugar exacto al utilizar los medios tecnológicos adecuados (García & Flego, 2015).

1.1.2 Formulación del Problema.

¿Cómo se podrá realizar el control del recurso hídrico en un cultivo hidropónico para la producción de tomate riñón variedad Daniela?

1.1.3 Preguntas directrices o específicas.

¿Cómo podre conocer las ventajas del cultivo hidropónico de riego por goteo?

¿De qué manera se podrá realizar el monitoreo y control del cultivo hidropónico?

¿Qué tipo de control avanzado se podrá utilizar para el sistema de control del cultivo hidropónico?

¿Cómo puedo evaluar que esta forma de cultivo y sistema de control es eficiente?

1.2 Justificación

“El mundo se enfrenta a un doble desafío sin precedentes: erradicar el hambre y la pobreza y estabilizar el clima mundial antes de que sea demasiado tarde” (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016).

Actualmente el mundo intenta construir una agricultura sostenible, acta para los cambios climáticos, que menoren los efectos de invernadero, y pueda suplir la alimentación mundial. Los gobiernos mediante un acuerdo han establecido mejorar la eficiencia de la agricultura (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016).

El actual gobierno Nacional requiere consolidarse como un país agrario con nuevas tecnologías de producción y cuidado al medio ambiente, por lo que la agricultura hidropónica puede ser una solución viable ya que proporciona varias ventajas a la agricultura normal; como:

- No se requiere el uso de suelo de cultivo
- Se puede producir en ambientes adversos
- Cultivo libre de vectores.

- Reducción del costo de producción.
- Tiempo de cosecha reducido
- Ahorro de agua
- Disminución de fertilizantes y nutrientes (Sumpsi, 2011).

La nueva tendencia para la agricultura se denomina agricultura de precisión; la misma que se encarga del manejo de cultivos por medio de la incorporación del conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la información cuantificada de los cultivos, tanto en su distribución temporal como espacial (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004).

Con el cultivo hidropónico, mediante un sistema automático de riego por goteo, y técnicas de control avanzado, se realizará la recolección de datos, procesamiento de datos, se realizará una mejora del sistema de agricultura y se obtendrá datos importantes de cultivo. Mediante un control avanzado se podrá tener una mayor eficiencia en el consumo de los recursos hídricos y los nutrientes necesarios. (Antillón, 2006).

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo General.

Implementar un sistema automático de riego por goteo basada en agricultura hidropónica mediante control fuzzy para la producción de tomate riñón variedad Daniela.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Definir las características de los cultivos hidropónicos, además de estudiar las características técnicas de los sensores y actuadores que se utilizan para el riego del recurso hídrico en los mencionados cultivos.
- Implementar una interfaz hombre-máquina para el monitoreo de temperatura, pH, humedad, conductividad eléctrica; y a su vez el control de los actuadores para el riego de la Solución Nutritiva y el recurso hídrico.
- Proponer un algoritmo de control basado en la teoría fuzzy para la automatización por goteo del riego de la Solución Nutritiva y del recurso hídrico aplicado a un cultivo hidropónico.

- Realizar evaluaciones experimentales del desempeño del algoritmo de control propuesto sobre un cultivo hidropónico para la producción de tomate variedad Daniela.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

Mediante un algoritmo de control Fuzzy se tiene un sistema automático por goteo para la producción de tomate riñón variedad Daniela.

1.4.2 Hipótesis Específicas.

- Se pueden definir las características de los cultivos hidropónicos para el control de riego.
- La interfaz hombre máquina permitirá monitorear y controlar las variables para la automatización del riego en cultivo hidropónico.
- El control Fuzzy permitirá realizar la automatización por goteo del riego de la Solución Nutritiva y del recurso hídrico aplicado a un cultivo hidropónico
- Con la evaluación de los datos se podrá conocer la eficiencia del control Fuzzy en el cultivo hidropónico.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Agricultura Hidropónica

2.1.1 Hidroponía

La palabra hidroponía proviene de dos palabras griegas “hydro” que significa agua y “ponos” que significa labor o trabajo. Hidroponía es un conjunto de técnicas del cultivo que permite que las plantas estén libres del uso del suelo, al usar elementos nutritivos en una solución líquida (Antillón, 2006).



Fotografía 1-1 Cultivo hidropónico de Tomate Riñón Variedad Daniela
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.1.2 Ventajas de la Hidroponía

Una de las grandes ventajas en tener un cultivo hidropónico, es la no utilización del suelo, donde se obtendrá cultivos libres parásitos, bacterias, hongos o de algún vector que perjudique al cultivo; otras de las ventajas de la hidroponía:

- Reducción de costos de producción.
- Permite un control más preciso sobre la nutrición de la planta.

- Proporciona un crecimiento más rápido de la planta, porque la solución nutritiva se encuentra en contacto directo con las raíces.
- No depende de fenómenos meteorológicos.
- Mayor eficiencia en el uso del agua.
- Ahorro en fertilizantes e insecticidas.
- No provoca erosión.
- Puede ser implementado en ciudades.
- Es una técnica adaptable a tus conocimientos, espacios y recursos.
- No se requiere materia orgánica.

2.1.3 Desventajas de la hidroponía

La principal desventaja del cultivo hidropónico es el costo inicial, ya que requiere un entorno controlado, y otros componentes como el sustrato, los contenedores, el sistema de riego, entre otros. Otra desventaja es la cantidad de cada componente en la solución nutritiva que requiere la planta en cada fase de crecimiento, por lo que posiblemente se requiera asesoramiento de personal calificado.

2.1.4 Requerimientos del sistema del cultivo hidropónico.

Un sistema de cultivo hidropónico posee varios requerimientos para realizar su función, que es suplir a las plantas de agua de riego y soluciones minerales sin la necesidad de usar suelo, se lo puede realizar tanto en zonas urbanas como en zonas rurales. Los requerimientos básicos son:

- Localización.
- Invernaderos
- Agua de riego
- Solución Nutritiva
- Sustrato
- Contenedor
- Material Vegetal a cultivar
- Sistema de control (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016).

2.1.4.1 Localización

El cultivo hidropónico puede ser instalado en cualquier parte rural o urbana, se debe considerar ciertas características, si es rural lo más recomendable es en un invernadero.

- Exposición solar mínimo de 6 horas al día.
- Evitar zonas donde se produzcan zonas, porque reduce la exposición del sol.
- El sitio debe ser un lugar protegido de condiciones climáticas adversas.
- Lugar con acceso a agua de riego.
- Para uso de invernaderos, debe tener una temperatura media de 15 a 18°C. Los cultivos deben de tener una orientación de norte a sur. La altura mínima del invernadero debe ser de 3 metros para una correcta circulación de aire (MC, 2013).

2.1.4.2 Invernaderos

Los invernaderos son estructuras cerradas hechas con materiales transparentes para recrear condiciones de microclima, y poder cultivar plantas fuera de temporadas y con condiciones óptimas. (Bouzo & Gariglio, 2014).



Fotografía 2-2 Invernadero tipo túnel para el cultivo hidropónico.
Fuente: (Lema Iván, 2017)

Las principales ventajas del uso de invernaderos son:

- Producción fuera de época o productos con climas de otro tipo de condición: con los invernaderos se puede recrear microclimas, donde los inviernos y veranos no pueden afectar directamente a la planta, al controlar ciertas condiciones del microclima internamente.

- Mejora del control de insectos y enfermedades: como el invernadero es un microclima controlado, esto nos permite prevenir parásitos, así como tratamientos para controlar las enfermedades o a las plagas.
- Continuidad de los frutos: el cultivo como se encuentra dentro un invernadero que está diseñado para tener ciertas condiciones ambientales internas para poder tener un buen desarrollo de la planta en forma continua, sin que le afecte demasiado el sol o el frío.
- Ahorro de agua y fertilizantes: dentro del invernadero se instalan sistemas de riego, donde se obtiene una mayor eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes (Bouzo & Gariglio, 2014).

Las principales desventajas son:

- Alto Costo inicial: una gran desventaja es el costo inicial al construir un invernadero, por lo que es aconsejable utilizarlos con cultivos que sean comerciales y redituables.
- Costo de operación alto: los costos para mantenimiento suelen ser altos, pero las ganancias con una buena producción pueden ser mayores.
- Condiciones óptimas para el ataque de vectores: como un invernadero da condiciones óptimas para los cultivos, también da condiciones óptimas para agentes patógenos, en donde se puede perder toda la producción si no se controla inmediatamente (Agrostart, n.d.).

Para la construcción de un invernadero debe considerarse los siguientes requerimientos:

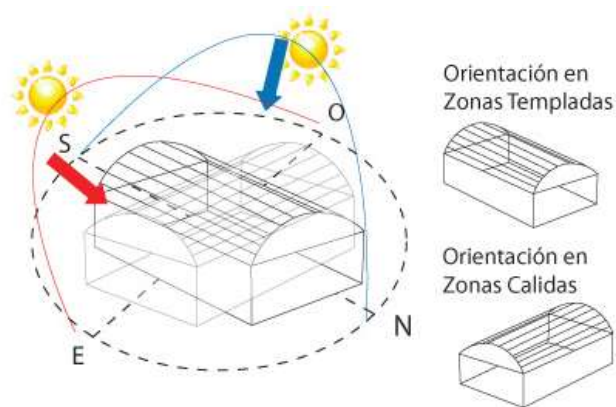


Figura 1-2 Orientación recomendada de los invernaderos
Fuente: (Hydro Environment, n.d.).

- El material debe ser económicos, ligeros, resistentes esbeltos, estructuras con poco volumen, fácil construcción.
- La ventilación debe ser eficaz, se recomienda que el área de ventilas sea aproximadamente un 15% al 30% del área del piso.

- La forma de los invernaderos debe ser de acuerdo a las condiciones climáticas y orografía, su orientación dependerá a la zona (Hydro Environment, n.d.).

Los invernaderos se pueden clasificar de acuerdo a la forma y el tipo de estructura se puede clasificar de la siguiente forma:

- **Invernadero tipo Túnel:** son resistentes a los vientos, de fácil instalación y un alto grado de traspaso de luz. Su principal desventaja que tiene una escasa inercia térmica (Von Zabeltitz, 2011).

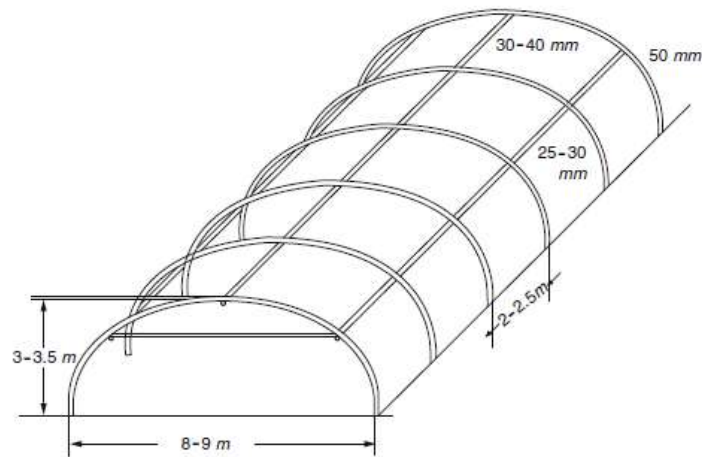


Figura 2-2 Invernadero tipo túnel.
Fuente: (Von Zabeltitz, 2011)

- **Invernadero tipo parral:** sus ventajas son baratos y sencillos, ofrece una gran capacidad del control del clima, buena capacidad de estanqueidad, permite ventanas cenitales. Sus desventajas son que por la condensación se produce una baja transmitancia de luz (Von Zabeltitz, 2011).

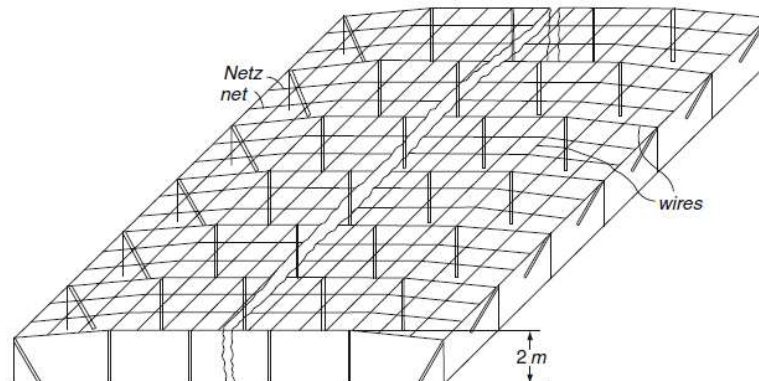


Figura 3-2 Invernadero tipo parral
Fuente: (Von Zabeltitz, 2011)

- **Invernadero Asimétrico:** Su principal característica es que tiene una cara más inclinada que la otra. Tiene ventilación natural y la salida del aire caliente. Su desventaja es la pérdida de calor en la cubierta (Novedades Agrícolas, n.d.-a).

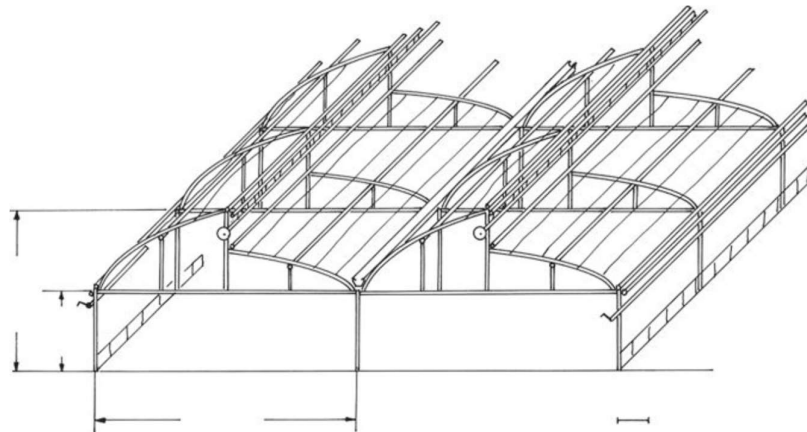


Figura 4-2 Invernadero Tipo Asimétrico
Fuente: (Von Zabeltitz, 2011).

- **Invernadero tipo Capilla:** su principal característica es que su techo está formado por dos planos inclinados o semicilíndricos. Una de sus ventajas es que se puede desfogar el agua lluvia. Su principal desventaja es su baja ventilación (Novedades Agrícolas, n.d.-b).

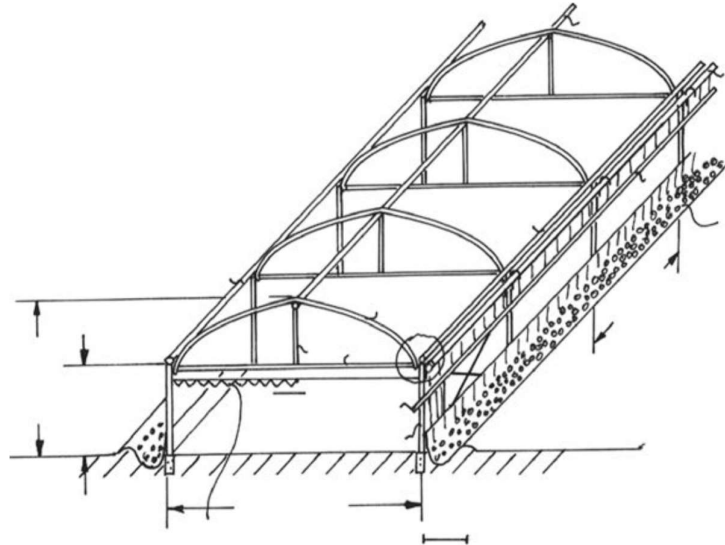


Figura 5-2 Invernadero Tipo Capilla
Fuente: (Von Zabeltitz, 2011)

2.1.4.3 Agua para riego

El agua forma una parte importante de los seres vivos, para las plantas forman parte de los procesos fisiológicos. El agua es el componente mayoritario de las plantas. Las funciones del agua en la planta son las siguientes:

- El agua cumple funciones de sostén.
- Permite el crecimiento de las plantas.
- Facilita el enfriamiento de las hojas.
- Es el vehículo de traslado de los nutrientes por el xilema y foto asimilados por el floema (Beltrano, J. Gimenez, 2015).

La hidroponía utiliza dos tipos de sustratos, los sustratos inertes y la solución nutritiva que proporcionan los minerales adecuados para el crecimiento de la planta. El agua para riego tiene que ser de buena calidad, ya que los sistemas de riego se pueden afectar por el contenido de limos y materiales en suspensión. La falta de agua puede producir estrés hídrico.



Fotografía 3-2 Cultivo de tomate con stress hídrico
Fuente: (Berrios, Arredondo, & Tjalling, 2007)

2.1.4.4 Solución Nutritiva

Se ha determinado mediante investigaciones que para el crecimiento y la nutrición vegetal existen ciertos elementos que favorecen a las plantas. Los elementos principales que permiten que las plantas crezcan en forma saludable son los macronutrientes y los micronutrientes. Los macronutrientes son los elementos que se pide en mayor cantidad y los micronutrientes que requieren en menor proporción pero son esenciales (Beltrano, J. Gimenez, 2015).

Los macronutrientes son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y los micronutrientes son Cobre (Cu), Boro (B), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl).

Las principales funciones de cada nutriente:

Tabla 1-2 Roles principales de los nutrientes

Nutriente	Función
<i>Nitrógeno (N)</i>	Síntesis de la clorofila y proteína (crecimiento y rendimiento).
<i>Fósforo (P)</i>	División de la célula y transferencia de energía.
<i>Potasio (K)</i>	Transporte de azúcar. Regulación del régimen de humedad.
<i>Calcio (Ca)</i>	Calidad de almacenamiento y menor susceptibilidad a enfermedades.
<i>Magnesio (Mg)</i>	Parte esencial de la molécula de la clorofila.
<i>Azufre (S)</i>	Síntesis de aminoácidos esenciales: cisteína y metionina.
<i>Hierro (Fe)</i>	Síntesis de clorofila.
<i>Zinc (Zn)</i>	Creimiento y desarrollo temprano (auxinas).
<i>Manganeso (Mn)</i>	Requerido para la fotosíntesis.
<i>Cobre (Cu)</i>	Influye en el metabolismo de hidratos de carbonos y del nitrógeno. Activador de la enzima para la producción de lignina y melanina.
<i>Boro (B)</i>	Para la formación de la pared celular (pectina y lignina), también como un componente estructural de la pared celular. Para el metabolismo y transporte de azúcar. Para la floración, cuaja y desarrollo de la semilla.
<i>Molibdeno (Mo)</i>	Forma parte del nitrato-reductasa.
<i>Cloro (Cl)</i>	Actúa como activador de enzimas para producción de oxígeno

Fuente: (Berrios et al., 2007)

La solución nutritiva para poder tener un cultivo óptimo debe tener las siguientes características:

- Conductividad eléctrica: Alrededor de 1200 a 2500 uS/cm.
- Ph: Ligera acidez entre 5.5. y 6.4.
- Temperatura: Alrededor de 18 °C (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016).

2.1.4.5 Sustrato

El sustrato es el material usado distinto del suelo, que es colocado en un contenedor en forma pura o en mezcla, para el desarrollo de las plantas y la asimilación de la solución nutritiva. En el mercado existen diferentes tipos de sustratos:

- Sustratos inorgánicos: son aquellos sustratos que tengan partículas menores a 2mm, como piedra pómez, grava, roca volcánica o tezontle, arena de río, perlita, vermiculita, arcillas expandidas, lana de roca. El uso dependerá de la humedad que se desee tener, del drenaje o su aplicación.
- Sustratos orgánicos: son desechos de alguna actividad agropecuaria o industrial; como: aserrín, fibra de coco, cascarilla de arroz, cascarilla de café, peat moss.
- Sustratos sintéticos, su mayor inconveniente es el precio, y son geles, espumas sintéticas, Foamy agrícola, entre otros (Environment, 2013).



Fotografía 4-2 Sustrato Peat moss
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para seleccionar un sustrato debe considerarse tres variables el precio, la disponibilidad y la retención del agua. Todo sustrato de origen orgánico debe ser tamizado, lavado y esterilizado para no tener ningún problema con el cultivo (Environment, 2013).



Fotografía 5-2 Sustrato Cascarilla de Arroz
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.1.4.6 Contenedores

Un contenedor es el medio que sirve para colocar el sustrato y un medio de sostén de la planta, de igual forma donde va estar los nutrientes y el agua que va servir para el cultivo para el desarrollo del mismo. Para construir un contenedor se debe considerar que sea de fácil revisión de enfermedades y plagas, que sea de fácil limpieza, que sea de fácil manejo y sea fácil el riego tanto del agua como de la solución nutritiva. Se debe considerar que las dimensiones del contenedor dependerán del desarrollo de las raíces de las plantas y de la disponibilidad del espacio, y del tipo de cultivo.



Fotografía 6-2 Contenedores de plástico con sustrato.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.1.4.7 Material Vegetal a cultivar

Los cultivos hidropónicos pueden ser usados en varias especies, el contenedor y el sustrato dependerá de la especie a cultivar, así como los programas de riego y fertilización (Beltrano, J. Gimenez, 2015).

Existen dos tipos de siembra:

- **Siembra directa:** Se lo realiza con la incorporación de las semillas en los sustratos.
- **Siembra por Trasplante:** Son plantas que necesitan un pequeño desarrollo en los semilleros para poder después ser trasplantado.



Fotografía 7-2 Siembra por trasplante en sustrato de tomate riñón.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.1.4.8 Sistema de Control del cultivo hidropónico

Para realizar el sistema de control para el cultivo hidropónico, se debe considerar todas las variables de entrada que se pueden modificar dentro del invernadero y las variables de salida del sistema, de igual también el tipo de riego que se va a ocupar. Las variables que se puede considerar son las siguientes:

- **Temperatura del aire:** la radiación solar se transforma en energía térmica dentro de un invernadero. El balance térmico es el resultado de las ganancias y pérdidas de energía calórica, que se propaga por radiación, convección y conducción (Beltrano, J. Gimenez, 2015).
El aire dentro de un invernadero cerrado sin calefacción es siempre más caliente dentro durante el día y más durante la noche en comparación con el aire externo.

Tabla 2-2 Temperaturas críticas para el cultivo de tomate

Condición:		Temperatura:
<i>Se hiela la planta</i>		-2°C
<i>Detiene su desarrollo</i>		10-12°C
<i>Desarrollo normal de la planta</i>		18-25°C
<i>Mayor desarrollo de la planta</i>		21-24°C
<i>Germinación óptima</i>		25-30°C
<i>Temperaturas óptimas</i>		
<i>Desarrollo</i>	<i>Diurno</i>	23-26°C
	<i>Nocturna</i>	13-16°C
<i>Floración</i>	<i>Diurno</i>	23-26°C
	<i>Nocturno</i>	15-18°C
<i>Maduración</i>		15-22°C

Fuente: (Francisco Camacho Ferre, 2017)

- **Temperatura del suelo o sustrato:** la temperatura del sustrato es generalmente mayor que la temperatura en el exterior. Los colores de las películas plásticas de los contenedores varían la temperatura. El uso de películas transparentes reduce el nivel de hongos que podría producirse en el suelo, las películas transparentes reducen las malezas. Mantener una temperatura estable a nivel radical de las plantas resulta beneficioso para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Beltrano, J. Gimenez, 2015).
- **Humedad relativa:** Al aumentar la humedad relativa dentro de un invernadero conlleva a la proliferación de hongos Fito patógenos. Por lo que se requiere ventilación. Otro problema con

excesiva humedad provoca el déficit de saturación donde el proceso fisiológico de la planta puede alterar el proceso transpiratorio de las plantas (Beltrano, J. Gimenez, 2015).

- **Dióxido de carbono:** El incremento de CO₂ incrementa la velocidad de la fotosíntesis y la cantidad de azúcar producida por el cultivo. Pero debe ser a determinado tiempo ya que el exceso en horas no adecuadas puede provocar estrés hídrico (Beltrano, J. Gimenez, 2015).
- **Humedad del suelo o sustrato:** la capacidad disponible de agua en el sustrato es el porcentaje de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo se refiere al terminar el proceso en una capa de sustrato donde el agua de los poros grandes del sustrato fluye hacia abajo. El punto de marchitez permanente es cuando el porcentaje de humedad en el suelo en el cual solo queda agua en los poros capilares y la planta tiene que vencer tensiones muy altas, el resultado es que las plantas se marchitan (HortiCultivos, 2016). La humedad óptima en los invernaderos de tomates es entre el 60% y 80% (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016).
- **Conductividad Eléctrica del suelo o sustrato:** la concentración de sales solubles en la solución del sustrato se mide mediante la conductividad eléctrica. Mientras mayor sea la concentración de sales mayor será la conductividad eléctrica. En los sustratos se recomienda que la conductividad eléctrica sea baja, ya que una baja conductividad facilita el manejo de la fertilización y evita problemas de fitotoxicidad en el cultivo (Barbaro Lorena A., Karlanian Monica A., n.d.). Una baja conductividad eléctrica aumenta el amarillamiento de las hojas, mientras que una conductividad elevada hace que las raíces sufran daños y sean susceptibles a problemas en las plantas. El rango óptimo para el cultivo de tomate es de 1500 a 3500 uS/cm.
- **pH del suelo o sustrato:** el pH es una medida de acidez o alcalinidad del medio; en otras palabras, indica la concentración de iones de hidrógeno que existe en una solución. El pH en un cultivo controla las reacciones químicas que determinan si los nutrientes van a ser solubles o insolubles para su absorción. Por lo que el pH de los tomates debe estar en un rango óptimo (Barbaro Lorena A., Karlanian Monica A., n.d.).

2.2 Riego por Goteo

Es un sistema de riego localizado de bajo caudal que utiliza emisores denominados goteros, tuberías goteadoras o tuberías exudantes. El riego localizado consiste en la aplicación de agua sobre la superficie del suelo o debajo de este. El riego por goteo hace que el agua circule a través de presión

por la instalación hasta los goteros, en los que pierde velocidad y presión donde se riega de gota a gota (Fernandez Gomez, Yruela Morillo, Milla Milla, & Garcia Bernal, Juan P. Oyonarte Gutierrez, 2010).



Fotografía 8-2 Riego por goteo del cultivo de tomate riñón.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.2.1 Ventajas del riego por goteo

Las ventajas del riego por goteo son las siguientes:

- Ahorro de agua.
- Un nivel de humedad en el suelo constante, sin encharcamiento.
- Se puede aplicar la fertirrigación, directamente en la zona radicular de las plantas.
- Un mejor manejo la cantidad de sales en el suelo (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016).

2.2.2 Componentes del sistema de riego por goteo

Los componentes principales de un cultivo de riego por goteo son los siguientes:

- **Cabezal de riego:** Es un conjunto de elementos destinados a filtrar, tratar, medir y suministrar en agua o el nutriente el sistema de riego. También suelen contar con un sistema de bombeo por lo general (Fernandez Gomez et al., 2010).
- **Red de distribución:** Está formada por las tuberías, que llevan el agua filtrada y tratada desde e cabezal, conjuntamente con los elementos singulares, que sirven de conexión entre las tuberías. Las tuberías generalmente son de PVC (policloruro de vinilo) o PE (polietileno) (Fernandez Gomez et al., 2010).

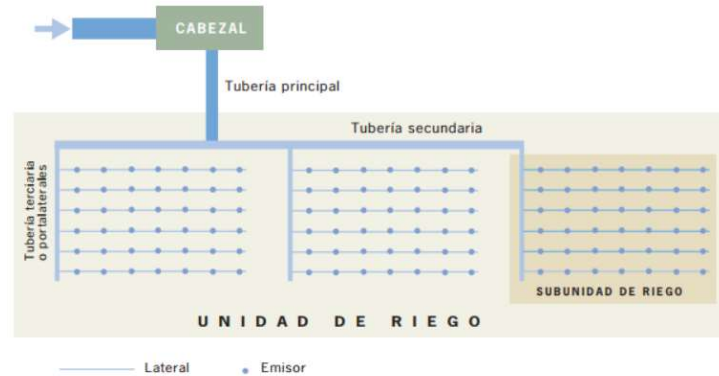


Figura 6-2 Componentes del sistema de riego por goteo
Fuente: (Fernandez Gomez et al., 2010)

- **Goteros:** Tipo de emisores de riego localizado, son fabricados de plástico que se colocan en las tuberías laterales, donde disipan la presión y hacen que salga el agua sin velocidad (al gotear) (Fernandez Gomez et al., 2010).
- **Dispositivos de control, medida y protección:** los dispositivos cumplen la función de dar información como caudal, presión. Los dispositivos de control regulan la circulación de agua por la red; mientras los de protección evitan que la red sufra efectos indeseados (Fernandez Gomez et al., 2010).

2.2.3 Fertirrigación

Consiste en la distribución del fertilizante a través del agua de riego, sirve para aportar al cultivo con los elementos nutritivos necesarios. Lo más usual es que se conecte al cabezal, pero en ciertas ocasiones se conecta en línea con el sistema de riego por goteo (Fernandez Gomez et al., 2010).

2.3 Control Fuzzy

2.3.1 Lógica Difusa

La lógica difusa está diseñada para reaccionar a cambios continuos de la variable a ser controlada, a diferencia de la lógica Booleana la lógica difusa no está restringido a dos valores. La lógica difusa permite múltiples valores parciales y varios valores de verdad. Un conjunto difuso se define como aquel conjunto que muestra todos los grados de pertenencia entre 0 y 1, incluidos éstos (Ponce Cruz, 2010).

Los conjuntos difusos se pueden presentar en forma continua o discreta. Un conjunto difuso discreto se representa:

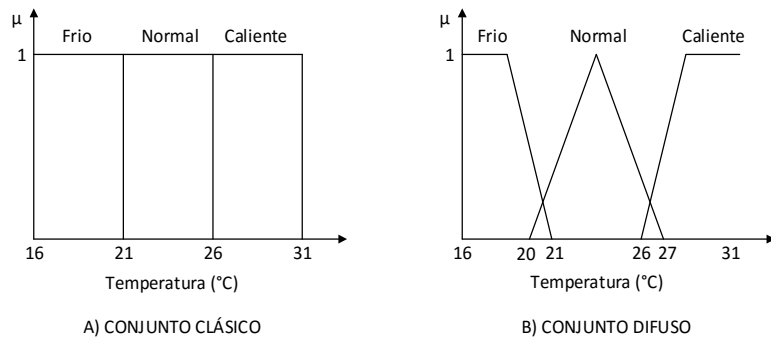
$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(X_i)}{X_i} \right\} \quad (1)$$

Un conjunto difuso continuo:

$$\tilde{A} = \left\{ \int \frac{\mu_A(X)}{X} \right\} \quad (2)$$

La lógica difusa se basa en la relatividad de lo observado, proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de una información de entrada ambigua (Jiménez Escamilla, 2012). A continuación, se indican algunos conceptos utilizados en la lógica difusa:

- **Etiqueta:** es la identificación o nombre descriptivo de un conjunto difuso.
- **Variable lingüística:** asocia a un conjunto de términos (Ej. Mucho, poco, positivo, negativo, etc.), que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto difuso. Son todas las palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno (Ponce Cruz, 2010).
- **Universo de discurso:** El rango de todos los valores posibles aplicados a una variable lingüística.



Gráfica 1-2 Representación del conjunto difuso de temperatura del sustrato
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.3.2 Operaciones entre relaciones difusas.

Las principales operaciones entre las relaciones difusas son:

- **Subconjunto o contención:** Para dos conjuntos difusos \tilde{A} y \tilde{B} sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, se dice que el conjunto difuso \tilde{A} está contenido en el conjunto difuso \tilde{B} , si y solamente si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$, es decir:

$$\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3)$$

- **Unión:** Para dos conjuntos difusos \tilde{A} y \tilde{B} sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, se dice que el resultado de efectuar la operación de unión entre estos dos conjuntos, es un nuevo conjunto difuso $\tilde{A} \cup \tilde{B}$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{A \cup B}(x)$, dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4)$$

- **Intersección:** Para dos conjuntos difusos \tilde{A} y \tilde{B} sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, se dice que el resultado de efectuar la operación de intersección entre estos dos conjuntos, es un nuevo conjunto difuso $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{A \cap B}(x)$, dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (5)$$

- **Complemento:** Para dos conjuntos difuso \tilde{A} sobre el mismo universo de discurso, y cuya función de pertenencia $\mu_A(x)$, se dice que el resultado de efectuar la operación de complemento, es un nuevo conjunto difuso \tilde{C} definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_C(x)$, dada por (Jiménez Escamilla, 2012):

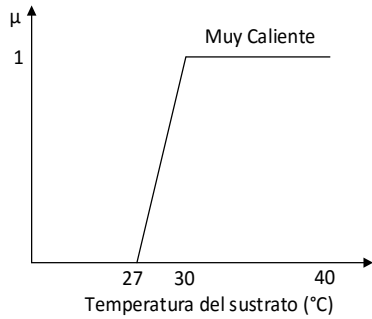
$$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (6)$$

2.3.3 Funciones de pertenencia:

Los conjuntos difusos contemplan la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es llamada función de membresía o pertenencia. La condición que debe cumplir para que sea una función de pertenencia es $\mu_A(x) \in [0,1]$ (Jiménez Escamilla, 2012).

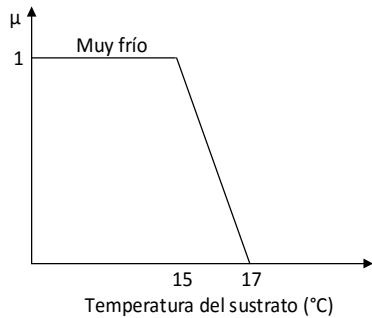
Existen varios ejemplos de funciones de membresía. Existen funciones que permiten asignar grados de membresía a cada uno de los elementos del conjunto. Las funciones de membresía realizan un mapeo de un universo nítido a un universo difuso (Ponce Cruz, 2010).

- **Función de saturación:** Tiene un valor desde 0 al formar una pendiente constante hasta llegar a 1. Esta función describe situaciones donde se alcanza un máximo desde cierto punto (Ponce Cruz, 2010).



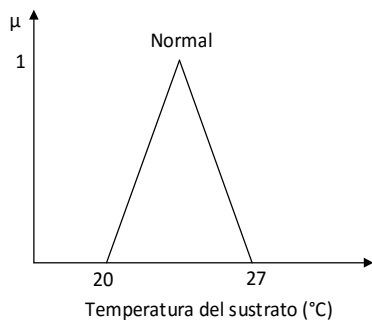
Gráfica 2-2 Función de saturación
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- **Función hombro:** Es la contraparte de la función de saturación, inicia en un valor unitario y forma una pendiente que desciende hasta alcanzar un valor de cero. Esta función describe en valores de pertenencia pequeña y decae conforme la variable aumenta (Ponce Cruz, 2010).



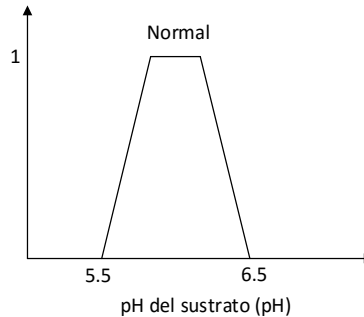
Gráfica 3-2 Función hombro
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- **Función triangular:** consta de una pendiente positiva y una pendiente negativa de forma uniforme hasta alcanzar la unidad. Esta función describe que tiene un valor óptimo central y disminuye cuando se aleja de él (Ponce Cruz, 2010).



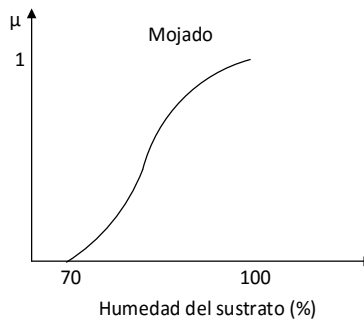
Gráfica 4-2 Función Triangular
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- **Función trapecio o PI:** la función no solo tiene un valor óptimo, sino una franja donde su valor de pertenencia es igual a 1. Esta función describe varios valores óptimos que disminuye cuando se aleja de cada lado final de la franja (Ponce Cruz, 2010).



Gráfica 5-2 Función Trapecio o Pi.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- **Función S o sigmoideal:** es similar a la función de saturación, pero su segmento es una curva de segundo orden. Forma una figura de s hasta llegar a 1. Esta función representa una función de saturación no tan drástica donde los cambios no son tan drásticos (Ponce Cruz, 2010).



Gráfica 6-2 Función Sigmoideal
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

2.3.4 Controladores difusos

Una de las principales aplicaciones de la lógica difusa es el control difuso, que utiliza expresiones difusas para formular reglas que controlaran dichos sistemas. La lógica difusa posee cierto grado de pertenencia que permite aun controlador difuso tomar diferentes grados de acción de un sistema. Los controladores difusos están compuestos por cuatro partes principales:

- Interfaz de difusificación.
- Base de conocimientos.

- Lógica de decisiones (Interferencias).
- Interfaz de desdifusificación.

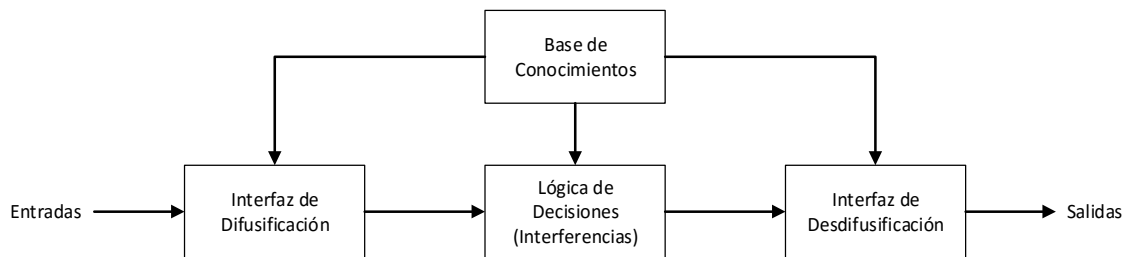
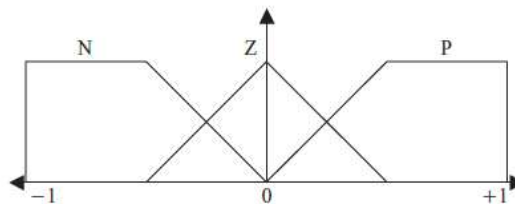


Figura 7-2 Estructura de un controlador difuso

Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

2.3.4.1 Interfaz de difusificación.

La interfaz de difusificación utiliza los valores de entrada a medir para realizar un mapeo a escala que transfiere el rango de variables a un universo de discurso difuso. La difusificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos. La información de los conjuntos difusos se los puede discretizar, al segmentar un universo en un número definido de partes. Se asocia una variable lingüística a un conjunto de términos del universo de discurso (Ponce Cruz, 2010).



Gráfica 7-2 Particiones difusas con distintos números de términos.

Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

2.3.4.2 Base de conocimientos

Contiene el conocimiento de la aplicación que se va aplicar, consta de una base de datos y una base de reglas lingüísticas para controlar las variables. La base de datos contiene la definición lingüística de las variables de entrada como de salida. La base de reglas combina los conjuntos difusos de entrada, llamadas antecedentes, y lo asocian a una salida, llamado consecuente. (Jiménez Escamilla, 2012).

El conjunto o base de reglas se define como:

$$\left(*_{1} \text{ es } L_{X_1}^{(k)} \text{ y } (\dots) \dots (\dots) \text{ y } (*_{n} \text{ es } L_{X_n}^{(k)}) \right), k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

Donde:

X : Dominio físico actual donde tienen los valores lingüísticos.

L_X : Conjunto de valores lingüísticos que $*$ puede tomar, un elemento arbitrario es L_* .

$*$: Nombre simbólico.

μ_X : Función semántica de interpretación de un valor lingüístico en términos cuantitativos.

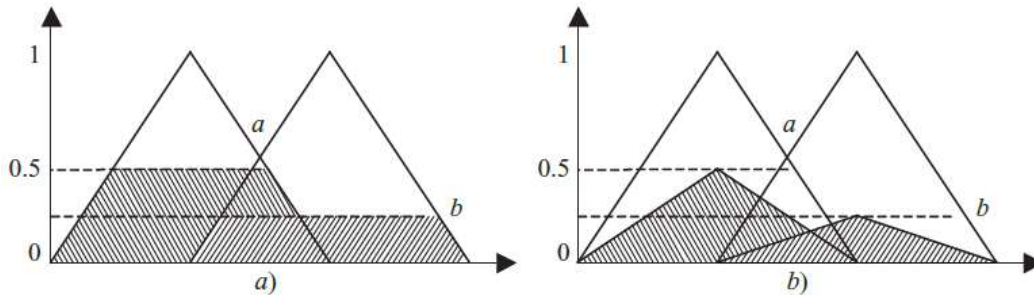
$$\mu_X: L_* \rightarrow \tilde{L}_X \quad (8)$$

2.3.4.3 Lógica de decisiones.

Es una simulación de la lógica que pueden tomar las personas, con base en conceptos difusos y en la interferencia de acciones de control, al emplear implicaciones y las reglas establecidas según la base de conocimientos. El resultado de las reglas serán conjuntos difusos recortados (Ecuación 9) o conjuntos escalados (Ecuación 10) (Ponce Cruz, 2010).

$$C_{\tilde{L}u}^{(1)}, \dots, C_{\tilde{L}u}^{(m)} \quad (9)$$

$$S_{\tilde{L}u}^{(1)}, \dots, S_{\tilde{L}u}^{(m)} \quad (10)$$



Gráfica 8-2 a) Conjuntos recortados y b) Conjuntos escalados

Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

2.3.4.4 Interfaz de desfusificación.

Se encarga del mapeo a escala que convierte el rango de valores de las variables de salida a su universo de discurso, al obtener una acción de control difusa. La salida de control es \tilde{u} o u_u se obtiene como la unión de las salidas de control cortadas o escalonadas (Ponce Cruz, 2010).

$$\tilde{u} = \bigcup_{k=1}^m u \ c\tilde{L}u^k \quad (11)$$

El valor nítido se denota por u^* y el área del conjunto se define por:

$$\int_u u_u(u) du \quad (12)$$

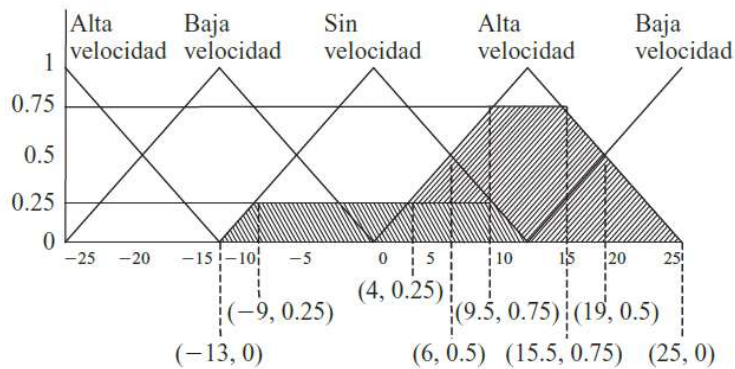
Existen algunos métodos para encontrar el valor nítido:

- **Método de centro de área o gravedad:** sirve para encontrar el valor real de la salida. La forma de encontrar la solución es segmentar las funciones de membresía, y generar en cada función dos áreas; donde ocupamos el área inferior para realizar el cálculo. Se sobreponen todas estas áreas y se saca el centroide de la superposición (Ponce Cruz, 2010).

Se representa el valor nítido de la siguiente manera en forma discreta (Ecuación 13) y en forma continua (Ecuación 14):

$$u^* = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu(x)} \quad (13)$$

$$u^* = \frac{\int_a^b \mu(x) \cdot x dx}{\int_a^b \mu(x) dx} \quad (14)$$



Gráfica 9-2 Corte de la función de membresía

Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

- **Método de centro máximo:** los pasos para el cálculo es encontrar el valor común de cada etiqueta, se lo realiza con el máximo de la respectiva función de membresía, se debe escoger el medio maximizado de las trapezoidales. Con los valores típicos se asignan un peso el cual es proporcional al grado de membresía y la salida con un balance de los valores distintos. Este método es más utilizado en funciones de membresía trapezoidal.
- **Método de izquierda máximo:** Es similar al método máximo, pero en vez de utilizar la mitad del máximo se utiliza el máximo izquierdo.

- **Método de derecha máximo:** Es similar al método máximo, pero en vez de utilizar la mitad del máximo se utiliza el máximo derecho.

2.3.5 Sistemas de control con Lógica Fuzzy

Los sistemas de control con lógica difusa se empezaron a utilizar ya que no requieren operaciones matemáticas complejas, ya que da una facilidad de cambiar el diseño de acuerdo a la descripción del lenguaje natural (Jiménez Escamilla, 2012).

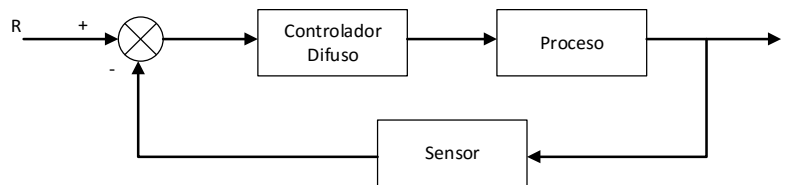


Figura 8-2 Controlador Difuso Clásico
Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

2.3.5.1 Tipos de controladores difusos por el motor de inferencia

Los controladores difusos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de motor de inferencia. Los principales métodos de inferencia tipo Takagi-Sugeno y Mandami.

- **Inferencia de Mandami:** Método propuesto por Ebrahim Mandami en 1975. Este método posee cuatro pasos para realizar la inferencia.
 1. **Fusificación de las variables de entrada:** consiste en tomar los valores de las etiquetas de las entradas y determinar el grado de pertenencia con los conjuntos difusos asociados.
 2. **Evaluación de las reglas:** con las entradas anteriores se aplican en los antecedentes, y utilizar los operadores AND u OR, para obtener un solo valor como resultado y este número se aplica en el consecuente.
 3. **Agregación de las salidas de las reglas:** es el proceso de unificación de todas las salidas de las reglas.
 4. **Defusificación:** Es el valor final de salida que es necesario interpretarlo con una etiqueta. El método generalmente usado por este algoritmo es el centroide (González Morcillo, 2011).

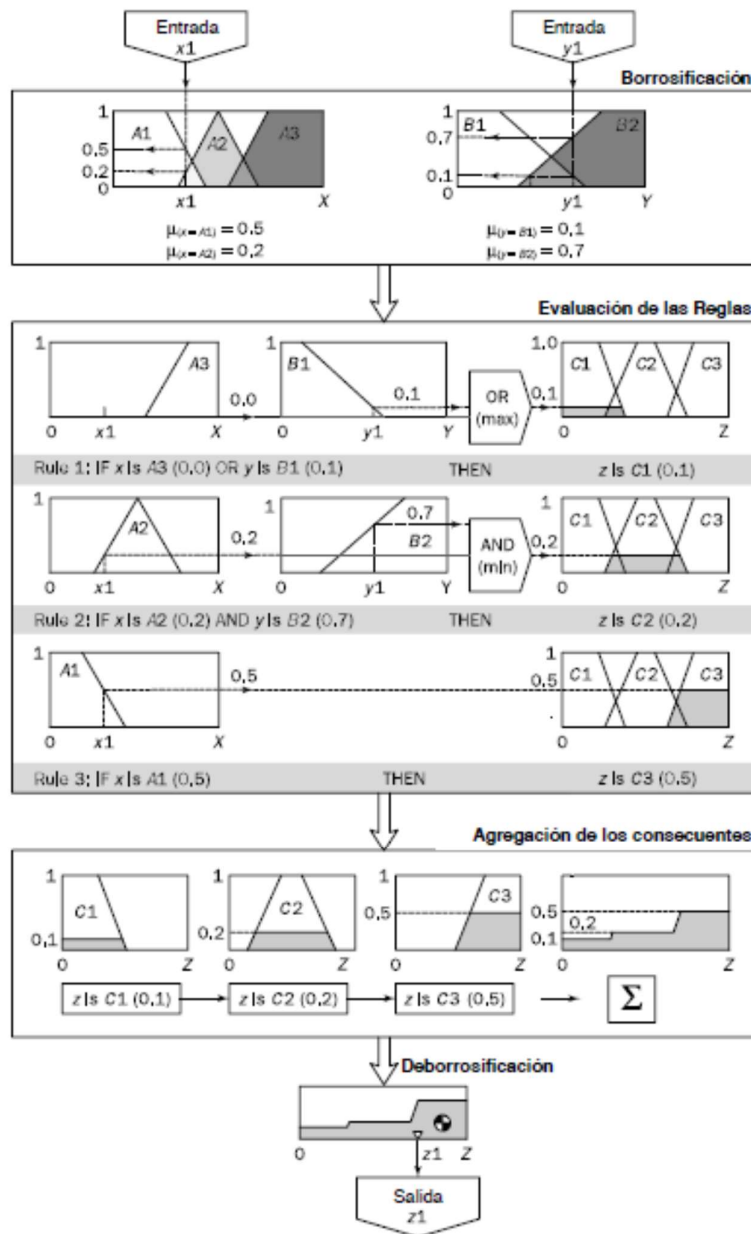


Figura 9-2 Estructura básica de la inferencia Mandami
Fuente: (González Morcillo, 2011)

- **Interferencia Takagi, Sugeno y Kang**

El método Mandami requiere algún tipo de método de defusificación, es muy eficiente desde el punto de vista computacional. La diferencia con el Mandami que es más eficiente desde el punto de vista computacional, al agregar una función matemática en el consecuente, para disminuir el tiempo.

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } f(x, y) \quad (13)$$

Pero esta respuesta no es t n natural, por lo que se toma una representación más habitual del consecuente con una función singleton, que toma un valor más habitual del universo de discurso y cero en cualquier otro punto. Donde k es un valor constante para singleton, La salida se obtiene con la media de pesos (González Morcillo, 2011).

$$p: \text{IF } x \text{ es } A \text{ AND } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } k \quad (14)$$

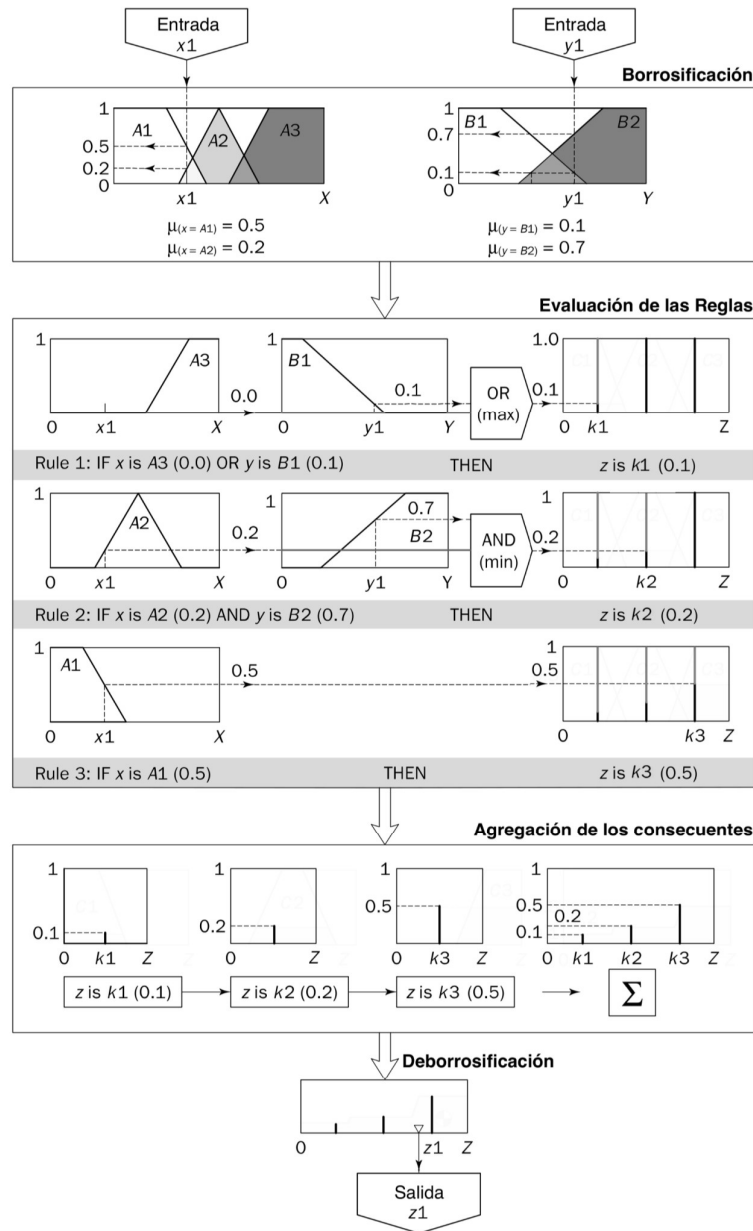
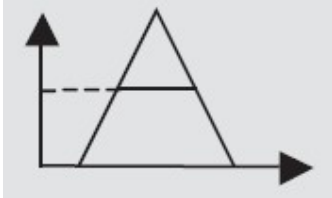



Figura 101-2 Estructura básica de interferencia de Takagi, Sugeno y Kang
Fuente: (González Morcillo, 2011)

A continuación, se muestra el resumen de los mecanismos de interferencia, existen otros métodos, pero estos dos son los más utilizados.

Tabla 3-2 Resumen de los mecanismos de interferencia

	Mandami	Takagi-Sugeno-Kang
Método de Implicación	Operador mínimo	
Composición de proposiciones	Operador máximo	
Activación de reglas $i = 1, 2$	$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$ $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$	$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$ $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$
Salidas individuales de reglas	$C'_1(w) = \alpha_1 \wedge C_1(w)$ $C'_2(w) = \alpha_2 \wedge C_2(w)$ (mínimo)	$Z_1^* = a_1x_0 + b_1y_0A$ $Z_2^* = a_2x_0 + b_2y_0$
Salida total del sistema	$C(w) = C'_1(w) \vee C'_2(w)$	
Salida determinística total	Método de desfusificación	$Z_0 = (\alpha_1 Z_1^* + \alpha_2 Z_2^*)$ $(\alpha_1 + \alpha_2)$
Base de n reglas, α_i es el nivel de activación de la regla i, $i = 1, 2, \dots, n$	$C(w) = \bigvee_{i=1}^n (\alpha_i \wedge C_i(w))$	$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Z_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$
Representación gráfica de los métodos		

Fuente: (Ponce Cruz, 2010)

2.3.5.2 Arquitecturas de control difuso

Una arquitectura de control difuso dependerá de la aplicación, y se lo dividirá de la siguiente forma:

- **Controladores difusos directos sin optimización:** consiste en un preprocesado de las variables de entrada y postprocesado de la salida del controlador, se subdividen de la siguiente forma:
 1. Controlador proporcional: $X = f(e)$
 2. Controlador integral: $X = f(s)$
 3. Controlador proporcional-derivativo: $X = f(e, \Delta e)$
 4. Controlador proporcional-integral: $X = f(e, s)$
 5. Controlador con realimentación no lineal: $X = f(R, S)$

Dónde: e es el error, Δe es la derivada del error, s es la integral del error, R y S representan las entradas y salidas de control (Jiménez Escamilla, 2012).

- **Controladores difusos directos con optimización:** son controladores difusos directo sin optimización que se agregan elementos que permiten ajustar los parámetros internos, con el fin de mejorar la eficiencia del mismo. Se subdividen por el tipo de optimizadores (Jiménez Escamilla, 2012).
 1. Controladores difusos auto-organizados.
 2. Controladores difusos con auto-aprendizaje.
 3. Controladores basados en modelado difuso.
- **Controladores difusos híbridos:** Son controladores difusos conformados por controladores interconectados, que sirven para mejorar la salida de las salidas de los controladores en ciertos rangos donde no es óptimo un controlador normal, también sirve para ajustar los parámetros de los controladores convencionales (Jiménez Escamilla, 2012).

2.4 Cultivo del Tomate Riñón Variedad Daniela

El tomate riñón es una hortaliza o planta herbácea durante sus fases tempranas, ya que en los últimos estadios del crecimiento del tallo se hace algo leñoso, aunque su cultivo necesite de tutores porque la zona radicular del cuello es muy débil. El tomate riñón variedad Daniela es una variedad con larga vida, este tipo de tomate se debe cultivar bajo invernadero (FAO, n.d.).

El sistema radicular de las plantas jóvenes de tomate es pivotante, pero la ramificación con el tiempo es difícil distinguirlas, la mayor parte de las raíces se sitúan en la capa superior del suelo, de 0 a 50 cm. La planta de tomate se caracteriza por su crecimiento simpodial, quiere decir que crece del tallo las hojas principales y mientras se desarrolla, donde sus partes axiales parecen más débiles.

2.4.1 *Etapas fenológicas de la planta de Tomate Riñón*

La planta de tomate tiene varias etapas de crecimiento, cada etapa necesita diferentes etapas de nutrientes. Las etapas son: establecimiento de la planta joven, crecimiento vegetativo, floración, desarrollo de la fruta, maduración. Cada etapa requiere diferentes necesidades nutricionales, variara de acuerdo al tipo, las condiciones ambientales, y el manejo del cultivo.



Figura 11-2 Fenología del cultivo del tomate riñón.

Fuente: (Berrios et al., 2007)

- **Establecimiento de la planta:** formación inicial de la planta y las partes aéreas. Desarrollo de la raíz. También puede trasplantarse plantas de semilleros.
- **Crecimiento Vegetativo:** En esta etapa la planta empieza un crecimiento rápido, el tallo comienza engrosar. En este periodo se realiza el tutorado, también se debe cortar los chupones.
- **Floración y cuaje:** Aparecen las primeras flores. Puede hacerse el cuaje por abejas, viento u otros métodos.
- **Desarrollo de la fruta:** La fruta empieza a desarrollarse y a crecer.
- **Madurez fisiológica y cosecha:** La fruta empieza a madurar y se puede realizar la respectiva cosecha.

2.4.2 *Desordenes Fisiológicos para tomate bajo invernadero.*

Los desórdenes fisiológicos en los tomates son causados por condiciones medioambientales extremas como temperaturas altas o bajas, humedad, alta, deficiencias nutricionales, entre otras causas. Las más comunes son las siguientes:

- **Pudrición apical del fruto (culillo):** Se presenta como una pudrición en la parte inferior del tomate. Es un desorden nutricional causado por la deficiencia de calcio y exceso de humedad.
- **Grietas en frutos (rajaduras):** Se manifiesta como rajaduras en los tomates, en formas concéntricas, radiales y axiales. Son producidos por riego irregular, fluctuaciones de humedad en el suelo, temperaturas extremas en el día y la noche, escasa vegetación, bajo niveles de potasio, calcio y magnesio.

- **Malformaciones (Cara de gato):** son malformaciones donde el tejido es corchoso en las cavidades, además se produce por la disminución o distorsión de los ovarios. Es producido por una alta humedad relativa y bajas temperaturas.
- **Caída de flores:** Se presenta por la humedad relativa es baja, y se encuentra expuesta a vientos. También es producida por la deficiencia de boro y aplicaciones excesivas de nitrógeno.
- **Maduración Manchada:** son producidas por bajas temperaturas, radiación solar alta, humedad relativa alta y deficiencia de potasio.
- **Hoja enrollada:** enroscamiento hacia arriba producido por condiciones extremas como estrés en las plantas, por falta de agua o temperaturas extremas altas o bajas. Enroscamiento hacia abajo producido por una exposición directa hacia el sol.
- **Frutos huecos:** ocasionado por el excesivo nitrógeno en la aplicación de fertilizantes (Jaramillo, Rodríguez, Guzmán, Zapata, & Rengifo, 2007).

CAPITULO III

3. CONTROL DE RIEGO POR GOTEO BASADO EL AGRICULTURA HIDROPÓNICA

Para la producción de tomate riñón variedad Daniela en un cultivo hidropónico por riego por goteo se debe considerar variables de control y monitoreo para activar los solenoides que da paso al riego tanto del agua como del nutriente. Para poder implementar un sistema de control de riego por goteo con hidroponía se debe considerar los siguientes requerimientos:

- Tipo y dimensiones del invernadero
- Tipo de cultivo
- Dimensiones del contenedor y tipo de sustrato
- Nutrientes
- Diseño e implementación del sistema de riego por goteo
- Diseño e implementación del control automático

3.1 Tipo y Dimensiones del Invernadero

Se ha determinado utilizar un invernadero tipo túnel por las características y las virtudes que brinda este tipo de invernadero, para la elección tomamos en cuenta los siguientes factores:



Figura 1-3 Ubicación geográfica del invernadero
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- Ubicación: Barrio San Gerardo, parroquia 11 de noviembre, ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, latitud -0.911637 y longitud -78.664670. A una altitud de 2869 metros.
- Clima: variado húmedo templado, seco en diferentes épocas del año. De -10 a 27°C.

Características del invernadero:

- Largo: 12 metros.
- Ancho: 6 metros.
- Altura al punto más alto: 3 metros.
- Separación entre arcos y anclajes: 1.5 metros.
- Puerta de ingresos: 1 x 2.5 metros.
- Numero de ventanas: 3.

Materiales usados para el invernadero:

- Tubo de PVC de 1 ¼" x 6 metros de largo: 12 Unidades.
- Plástico para el invernadero: 60 metros.
- Tubo cuadrado de ½" x 6 metros de largo: 13 Unidades.
- Tubo redondo de ½" x 6 metros de largo: 4 Unidades.

A través del invernadero están tendidas cables de acero, en total son 6, que atraviesa por encima y en el centro de cada contenedor, a una altura de 2 metros, este cable sirve para tutorar las plantas de tomate.

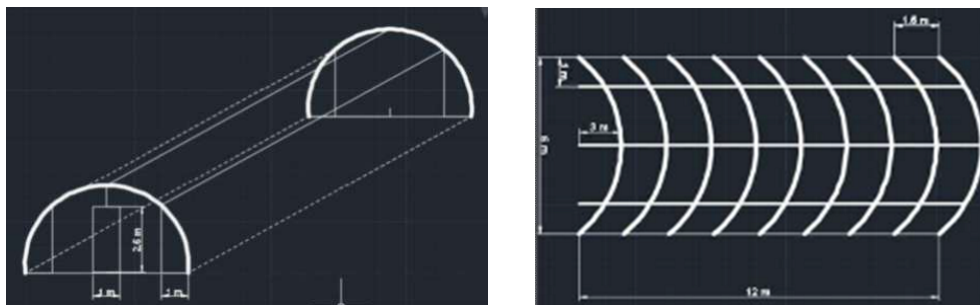


Figura 2-3 Vista lateral y superior del invernadero tipo túnel construido.
Elaborado por: (Lema Iván, 2017)

3.2 Tipo de Cultivo

El cultivo que vamos a realizar es de tomate riñón variedad Daniela. Se trasplantará 24 plantas de tomate en cada contenedor (existen 6 contenedores), que se adquirieron en un semillero local. Se

debe considerar que este tipo de cultivo en la etapa fenológica de crecimiento se debe tutorar, ya que es una planta herbácea débil hasta que termine su fase de crecimiento. Se debe podar los chupones para que tenga un mejor desarrollo y exista un tallo principal. Al momento que crece la planta y empiezan a salir los frutos de tomate se debe podar las hojas aladañas para que exista mejor circulación del aire para el tomate, hasta su maduración.



Fotografía 1-3 Totoreo de la planta de Tomate
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

El tipo de riego será por goteo, donde se utilizó las variables de temperatura del sustrato, humedad del sustrato, pH del sustrato, y la conductividad eléctrica del sustrato para controlar la cantidad de agua de riego y fertilizante (nutrientes) para obtener un óptimo crecimiento de las plantas de tomate.

Tabla 1.3 Variables de medidas óptimas para el cultivo de tomate

Variable de Medida del sustrato	Rango óptimo
<i>Temperatura</i>	21 a 27 [°C]
<i>Humedad</i>	60 a 75 [%]
<i>pH</i>	5.5 a 6.5 [pH]
<i>Conductividad Eléctrica</i>	1500 a 3500 [uS/cm]

Elaborado por: (Lema Iván, 2017)

3.3 Dimensiones del Contenedor y Tipo de Sustrato

Los contenedores tendrán una profundidad de 25 [cm], largo 10 [metros] y de ancho 25 [cm]. Llevará estacas que tendrán al plástico. En el contenedor se colocará el sustrato que tendrá sustrato del tipo orgánico. El contenedor tendrá un pequeño ángulo de inclinación donde evacuará el agua sobrante u

nutriente que estará en exceso. El contenedor será de plástico para que posea una mejor absorción del calor y exista menos cantidad de elementos patógenos o bacterias.



Fotografía 2-3 Colocación del nutriente sobre contenedor
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para el sustrato se colocó dos del tipo orgánico, las cascarillas de arroz y peat moss. La cascarilla de arroz tiene una capacidad de retención de humedad del 40%. El peat moss generalmente es un material importado de Canadá, es un material similar a la fibra de coco, tiene una capacidad de retención de humedad del 70%. En cada cama se coloca un quintal de cascarilla de arroz y un quintal de peat moss. Antes la cascarilla de arroz debe ser tratada para eliminar todos los hongos que pueda tener esta, ya que no es de uso comercial y fue compra local.

En el sustrato se trasplantará la planta de tomate a una distancia de 0.25 cm, y dar suficiente espacio entre plantas para que las raíces puedan crecer de forma óptima, además las raíces crecen a nivel de profundidad alrededor de 0.25 cm.

3.4 Nutrientes

La colocación del nutriente variará dependerá de la etapa fisiológica, los nutrientes que se coloca son comerciales, pero no tienen todos los elementos necesarios, ya que no se pueden mezclar, adicionalmente se añadirá nitrato de calcio, urea, entre otros nutrientes, para compensar los elementos faltantes para el cultivo de tomate riñón variedad Daniela, estos componentes son:

- **Kelato de manganeso:** Interviene en la formación de clorofila y carbohidratos, así como en la descomposición de éstos últimos
- **Nitrato de Calcio sólido:** Contiene algo de amonio para el control de pH.
- **Nitrato de potasio:** Para aumentar la presión osmótica del suelo para mejorar el °Brix y el contenido de materia seca de las frutas.

- **Calcio líquido:** No contiene amonio.
- **Poliverdor:** posee 25% de potasio y 20% de azufre
- **Ceniza:** "Para el control de hongos y gusanos. Aumenta la cantidad de potasio.
- **Urea:** Aumenta la cantidad de nitrógeno.

3.4.1 Nutrientes para el establecimiento de las plantas.

Las plantas serán trasplantadas, para esta primera fase se coloca la versión comercial para el fertirriego SOLUCAT 25-5-5, que servirá de mejor manera para el desarrollo radicular. También se añade urea, la cantidad de ½ kilo por semana.



Fotografía 3-3 Transplante de plantas de tomate
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Tabla 2-3 Macronutrientes y micronutrientes del SOLUCAT 25-5-5

NUTRIENTE	MEDIDA: [% p/p]
<i>Nitrógeno (N) total</i>	25%
<i>Nitrógeno (N) ureico</i>	12%
<i>Nitrógeno (N) amoniacal</i>	13%
<i>Nitrógeno (N) nítrico</i>	0%
<i>Pentóxido de fósforo (P2O5)</i>	5%
<i>Nitrógeno (N) total</i>	25%
<i>Óxido de potasio (K2O)</i>	5%
<i>Hierro (Fe) EDTA</i>	0.02%
<i>Manganeso (Mn) EDTA</i>	0.01%
<i>Boro (B) soluble en agua</i>	0.01%
<i>Cobre (Cu) EDTA</i>	0.002%
<i>Zinc (Zn) EDTA</i>	0.002%

Fuente: (SOLUCAT, 2017)

3.4.2 Nutrientes para el crecimiento Vegetativo.

Para el crecimiento vegetativo se debe ocupar MINERALGOLD 10-52-10 + ME, su aplicación está indicada durante aquellos momentos de necesidad de desarrollo radicular, floración o cuando sea necesario un mayor aporte de fósforo (engrose de la planta). También se coloca nitrato de calcio en forma sólida y ceniza, ambas serán la cantidad de ½ kilo por cama una vez a la semana.

Tabla 3-3 Macronutrientes y micronutrientes del MINERAGOLD 10-52-10 +ME

NUTRIENTE	MEDIDA: [% p/p]
<i>Nitrógeno (N) total</i>	10%
<i>Nitrógeno (N) ureico</i>	0%
<i>Nitrógeno (N) amoniacal</i>	10%
<i>Nitrógeno (N) nítrico</i>	0%
<i>Pentóxido de fósforo (P2O5) Total soluble en agua.</i>	52%
<i>Óxido de potasio (K2O) soluble en agua</i>	10%
<i>Hierro (Fe) EDTA</i>	0.02%
<i>Manganeso (Mn) EDTA</i>	0.01%
<i>Boro (B) soluble en agua</i>	0.01%
<i>Cobre (Cu) EDTA</i>	0.002%
<i>Zinc (Zn) EDTA</i>	0.002%

Fuente: (ECONATUR, 2017)

3.4.3 Nutrientes para la floración y cuaja



Fotografía 4-3 Floración de la planta de tomate
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para esta etapa se utiliza el MINERAGOLD 10-10-40 + ME, En aplicación foliar o riego localizado. Su aplicación para el fructificación o aportar potasio al cultivo, además de favorecer la madurez del fruto para mantener activa la vegetación y floración del cultivo. Adicional se coloca poliverdor, nitrato de potasio en forma líquida a través de esparción es decir directamente a la planta. También se añade calcio sólido y abono 15-15-15 la cantidad de ½ kilo por cama una vez a la semana.

Tabla 4-3 Macronutrientes y micronutrientes del MINERAGOLD 10-10-40 +ME

NUTRIENTE	MEDIDA: [% p/p]
<i>Nitrógeno (N) total</i>	10%
<i>Nitrógeno (N) ureico</i>	3%
<i>Nitrógeno (N) amoniacal</i>	2%
<i>Nitrógeno (N) nítrico</i>	5%
<i>Pentóxido de fósforo (P2O5) Total soluble en agua.</i>	10%
<i>Óxido de potasio (K2O) soluble en agua</i>	40%
<i>Hierro (Fe) EDTA</i>	0.02%
<i>Manganeso (Mn) EDTA</i>	0.01%
<i>Boro (B) soluble en agua</i>	0.02%
<i>Cobre (Cu) EDTA</i>	0.002%
<i>Zinc (Zn) EDTA</i>	0.002%

Fuente: (ECONATUR, 2017)

3.4.4 Nutrientes para el desarrollo de la fruta

Se ocupa el mismo MINERALGOLD 10-10-40+ME. También se aplica calcio líquido y quelato de manganeso, nitrato de calcio ½ kilo por cama una vez a la semana.



Fotografía 5-3 Desarrollo de la fruta de la planta de tomate

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.4.5 Nutrientes para la madurez fisiológica y cosecha.

Se utilizará la versión comercial INNUTRI 20-20-20, Su aplicación está indicada durante cualquier momento del ciclo del cultivo. De igual forma se coloca abono 15-15-15 y nitrato de calcio.

Tabla 5-3 Macronutrientes y micronutrientes del INNUTRI 20-20-20

NUTRIENTE	MEDIDA: [% p/p]
Nitrógeno (N) total	200%
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅) Total soluble en agua.	20%
Óxido de potasio (K ₂ O) soluble en agua	20%
Hierro (Fe) EDTA	0.10%
Manganeso (Mn) EDTA	0.05%
Boro (B) soluble en agua	0.02%
Cobre (Cu) EDTA	0.05%
Zinc (Zn) EDTA	0.05%
Molibdeno (Mo)	0.0005%

Fuente: (SOLINAG, 2017)

3.5 Diseño e Implementación del Sistema de Riego por Goteo.



Fotografía 6-3 Extracción del agua para riego

Fuente: (Lema Iván, 2017)

Para diseñar el sistema de riego por goteo, se consideró la disposición de agua hasta el cabezal de sistema de riego, el agua que se utilizará vendrá de un pozo, que se extrae con una bomba hacia un tanque reservorio y así obtener una presión con caudal constante de agua, se debe decir que también posee un prefiltrado del agua después del tanque. El sistema de riego debe proporcionar un goteo constante y uniforme, sin pérdidas de presión en la línea.

3.5.2 Características de los equipos principales del sistema de riego por goteo implementado.

3.5.2.1 Electroválvulas - BERMAD SERIE 200

Este tipo de electroválvulas son de plástico, excelentes para la aplicación para sistemas de irrigación en la agricultura. La electroválvula usa el diferencial de presión para que el diafragma pueda abrir o cerrar la válvula.

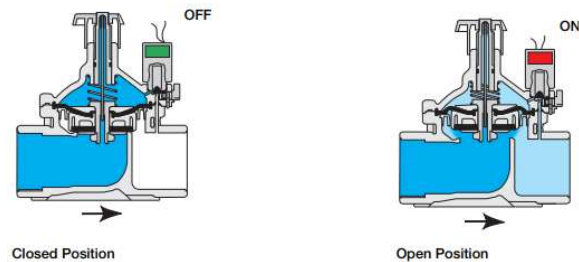


Figura 4-3 Funcionamiento de las electroválvulas.
Fuente: (BERMAND, 2017)

Especificaciones:

- Válvula de 1" tipo globo.
- Conexión roscada hembra tipo NPT.
- Presión máxima: 150 psi.
- Pérdida de presión de 15 psi @ un flujo de 12.1 gpm.
- Rango de presión para operación: 10 a 150 psi.
- Materiales:
 - Cuerpo y cubierta: Nilón reforzado.
 - Partes de metal: de aceros inoxidable.
 - Diafragma: Buna-N.
 - Sellos: Buna-N
 - Resorte: Acero inoxidable.
 - Tornillos de la cubierta: Acero inoxidable.
- Tipo de válvula: de dos vías.
- Solenoide:
 - Voltaje de operación: 24VAC.
 - Potencia: 1.7 vatios.
 - Corriente de arranque: 0.25 A.
 - Corriente de trabajo: 0.125 A.
 - Resistencia de la bobina @ 20°C; 68°F: 37.5 ohm.

3.5.2.2 Bomba de agua – MILANO QB-60

La bomba de agua debe cumplir los requerimientos de presión y caudal para suministrar el nutriente necesario para todo el cultivo por el riego por goteo.



Figura 53-3 Bomba de agua
Fuente: (MILANO, 2017)

Especificaciones:

- Diámetro de entrada: 25.
- Diámetro de salida: 25.
- Potencia: 0.37 KW.
- Caudal máximo: 35 l/min.
- Altura máxima: 35 m.c.a.
- Peso: 5.8 Kg.
- Grado de protección: IP 44.
- Temperatura máxima de agua: 40°C.

3.5.2.3 Goteros Integrados.



Figura 6-3 Goteros integrados
Fuente: (Fernandez Gomez et al., 2010)

Los goteros integrados son de forma de tubo de diámetro poco mayor al diámetro interior de la tubería porta emisora. Se encuentra dentro de las cintas de goteo, las cintas de goteo son flexibles de fácil instalación.

3.6 Diseño e Implementación del Control Automático de Riego por Goteo.

Para realizar el control automático del sistema de riego se divide en partes o fases, que son las siguientes:

- Diseño del control del sistema de riego por goteo.
- Diseño del sistema de comunicación entre equipos e instrumentos.
- Selección de equipos e instrumentos.
- Diseño de la arquitectura del sistema de control.
- Diseño de controlador difuso.
- Diseño e Implementación de una Interfaz Hombre-Maquina
- Diseño e Implementación de una Base de Datos.
- Implementación del sistema de control

3.6.1 Diseño de control del sistema de riego por goteo

Para el sistema de riego por goteo, se tenderán 6 cintas de goteo, que partirán de un cabezal, donde se conectara a una manguera principal, capaz de cumplir el caudal necesario para que no exista una pérdida de caudal en la última cinta de goteo. El sistema de riego por goteo suplirá agua para riego y nutriente o fertilizante; que serán controladas por electroválvulas. El sistema de control de riego será realizado mediante las tarjetas de control.

Mediante el diagrama P&ID se definió la filosofía de operación del sistema de riego por goteo. Consideramos que se posee agua constante como suministro tango para el tanque para mezclar la solución nutritiva o fertilizante, como el agua de riego. La válvula para dar paso para el suministro de agua para riego es la “BV-01”, la válvula que sirve para llenar el tanque para realizar o mezclar la solución nutritiva es la “BV-02”, se tiene una válvula de retorno al tanque de solución nutritiva, esta válvula sirve cuando se encienda la bomba su caudal que nos es consumido por los contenedores tenga el retorno al tanque. Se posee dos electroválvulas, la primera sirve para controlar el suministro de agua de riego, “XV-01”, la activación lo realizará el solenoide “XY-001; para el suministro de la

3.6.2 Diseño del sistema de comunicación entre equipos e instrumentos

En el diagrama de comunicaciones los instrumentos de humedad, pH y conductividad eléctrica (MT-001, NT-002 y CT-002) enviarán señales análogas de 0 a 5 voltios; mientras que el instrumento de medición de temperatura (TT-001) enviará una señal de datos mediante un protocolo llamado “one wire” que se lo explicará más adelante; todas estas señales de datos serán enviadas a la tarjeta de control; que mediante el control difuso dará señales de activación a las electroválvulas para la elección del agua de riego o el nutriente (fertilizante), todo esto pasará a través de una interfaz de potencia ya que las solenoides funcionan a 24 VAC y para que la tarjeta de control no sufra daños en su interfaz ya que las salidas digitales no son aisladas.

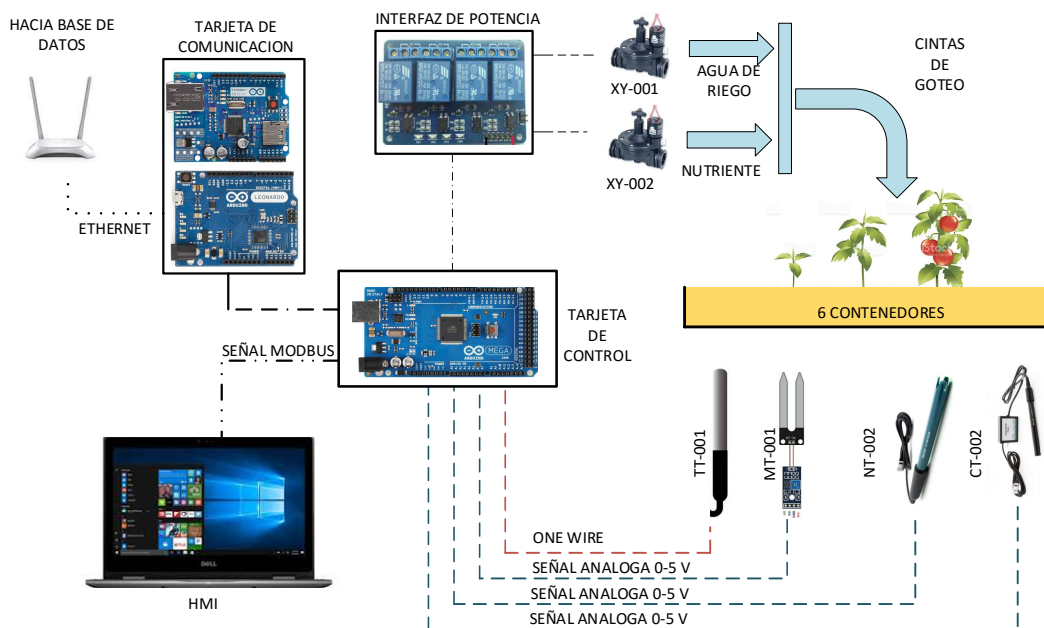


Figura 8-3 Diagrama de comunicaciones del sistema de control de riego por goteo.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

La comunicación hasta el HMI será a través del protocolo Modbus serial, donde se tiene un monitoreo de los datos de los sensores, activación de las solenoides y tiempos de control que será determinado por el control difuso. Para enviar los datos hacia una base de datos se adquiere las señales de los sensores y las señales de activación de los solenoides para enviarlas hacia una tarjeta de comunicación y as u vez con el protocolo Ethernet enviarla hacia un router para enviar de forma inalámbrica hacia el propio servidor.

- **Protocolo Modbus RTU:** El protocolo Modbus RTU es de uso industrial, su arquitectura es maestro esclavo. La comunicación es multipunto que depenerá de la configuración usada de la

capa física (RS-232, RS-485). Es protocolo estándar de la industria libre. El protocolo Modbus RTU realiza la comunicación entre dispositivos y envía mensajes en un byte, su ventaja es que permite una mayor densidad de datos (Bedón Álvarez & Tovar Herrera, 2016).

- **Protocolo de comunicación One Wire:** Es un protocolo de comunicación que funciona en bus de datos, proporciona datos de baja velocidad, y energía de alimentación de 5 voltios, su arquitectura es maestro-esclavo. Se puede colocar varios dispositivos en el bus de datos.
- **Señales análogas 0-5 V:** Las señales análogas de 0 a 5 voltios varían en función del cambio de la variable del sensor, son señales en corriente continua.
- **Señales on-off:** Son señales que emplean un alto o un bajo, para nuestro caso es para la activación de los solenoides de las electroválvulas, o para activar ciertos equipos que no necesite un cambio en función del tiempo, solo un 0 o 1 lógico.

3.6.3 Selección de equipos e instrumentos

Para realizar el control del riego por goteo se usa equipos, tarjetas, instrumentos entre otros elementos. Cada elemento tiene su propósito dentro del sistema de control. A continuación, se da una explicación de cada equipo o instrumento. Cada equipo fue seleccionado de acuerdo a las características de la tarjeta de control.

3.6.3.1 Tarjeta de Control – Arduino MEGA

Arduino MEGA es una placa electrónica basada en el ATmega1280, cuenta con 54 pines para entrada y salida, 14 de los cuales pueden ser salidas PWM, posee 16 entradas analógicas, 4 puertos serie, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación.

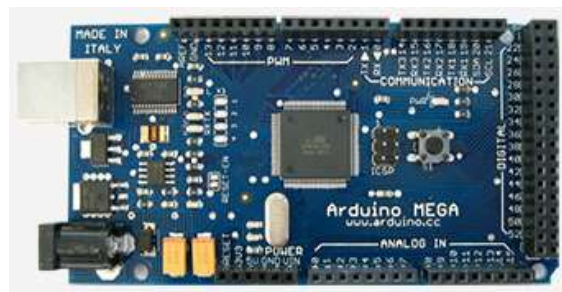


Figura 9-3 Arduino MEGA
Fuente: (ARDUINO, 2017)

Especificaciones:

Tabla 6-3 Hoja de datos de Arduino MEGA

HOJA DE DATOS			
<i>Microcontrolador:</i>	ATmega1280	<i>Digital I/O Pins:</i>	54 (15 con salidas PWM)
<i>Tensión de funcionamiento:</i>	5 V	<i>Entrada Analógicas Pins:</i>	16
<i>Tensión de entrada (recomendado):</i>	7-12 V	<i>Corriente CC por I/O pin:</i>	40 mA
<i>Tensión de entrada (límites):</i>	6-20 V	<i>Corriente de CC para 3.3 V pin:</i>	50 mA
<i>Memoria Flash</i>	128 KB (4KB utilizados para bootloader)	<i>Memoria EEPROM:</i>	4KB
<i>SRAM:</i>	8 KB	<i>Velocidad de reloj:</i>	16 MHz

Fuente: (ARDUINO, 2017)

Para nuestro proyecto la tarjeta de control Arduino Mega contiene las entradas y salidas requeridas por el sistema de control de riego por goteo, adicional posee una comunicación serial para realizar la comunicación modbus, también es compatible para leer el protocolo de comunicación one wire, las entradas y salidas que vamos a usar son de tensión máxima a 5 voltios.

3.6.3.2 Tarjeta de Comunicación – Arduino Leonardo con Ethernet Shield.

Tarjeta Arduino Leonardo es una placa electrónica que utiliza un microcontrolador ATmega32U4, posee conectividad USB, posee librerías para emular teclados, mouse, protocolo USB-HID, posee 20 pines de entradas y salidas digitales (7 pueden ser usados como salidas PWM y 12 como entradas analógicas).



Figura 4-3 Arduino Leonardo

Fuente: (ARDUINO, 2017)

Tabla 7-3 Hoja de datos de arduino Leonardo

HOJA DE DATOS			
<i>Microcontrolador:</i>	ATmega1280	<i>Digital I/O Pins:</i>	20 (7 con salidas PWM)
<i>Tensión de funcionamiento:</i>	5 V	<i>Entrada Analógicas Pins:</i>	12
<i>Tension de entrada (recomendado):</i>	7-12 V	<i>Corriente CC por I/O pin:</i>	40 mA
<i>Tensión de entrada (límites):</i>	6-20 V	<i>Corriente de CC para 3.3 V pin:</i>	50 mA
<i>Memoria Flash</i>	32 KB (4KB utilizados para bootloader)	<i>Memoria EEPROM:</i>	1 KB
<i>SRAM:</i>	2.5 KB	<i>Velocidad de reloj:</i>	16 MHz

Fuente: (ARDUINO, 2017)

La placa para la comunicación Ethernet será el Arduino Ethernet Shield R2, está basado en el chip Ethernet Wiznet W5100, dispone de una pila de red IP capaz de estar en los protocolos TCP y UDP. Sus librerías Ethernet permiten tener una conectividad hacia el internet.



Figura 11-3 Ethernet Shield

Fuente: (ARDUINO, 2017)

3.6.3.3 Transmisor y sensor de temperatura – Sensor Digital de Temperatura DS18B20.

El sensor de temperatura DS18B20 es digital que ocupa el protocolo 1-Wire para la comunicación mediante un solo pin de datos, se puede colocar varios sensores en el mismo bus de datos. El sensor se encuentra dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua.

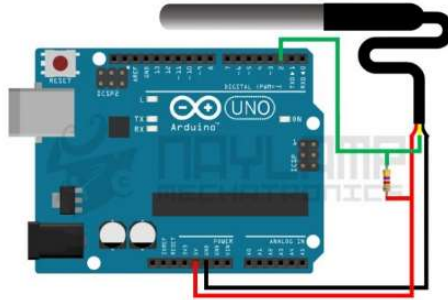


Figura 12-3 Sensor de temperatura DS18B20
Fuente: (ARDUINO, 2017)

El rango de temperatura del sensor es de -55°C a 125°C , tiene una resolución programable de 9 bits hasta 12 bits. Tiene una dirección única de 64 bits establecida de fábrica, es de gran ayuda si existen más sensores en el mismo bus de datos.

Especificaciones:

- Protocolo de comunicación 1-wire, un solo hilo de comunicación.
- Puede utilizarse como un bus de datos para varios sensores.
- No requiere componentes externos.
- Puede alimentarse de la propia línea de comunicación. El rango de alimentación es de 3.0 V a 5.5 V.
- Rango de temperatura desde -55°C hasta $+125^{\circ}\text{C}$ (-67°F hasta $+257^{\circ}\text{F}$).
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de precisión de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$.
- Resolución de termómetro es programable de 9 a 12 bits.
- Convierte la temperatura de resolución de 12 bits a una palabra digital en 750ms máximo.

3.6.3.4 Transmisor y Sensor de Humedad – Sensor YL-69 Y Conversor YL-38.

El principio de funcionamiento del sensor YL-69 se basa en la introducción de una corriente a través del suelo o sustrato mediante la diferencia de potencial entre los dos electrodos, al aplicar esta existe una impedancia opuesta al paso de la corriente. Al aumentar la humedad la corriente aumenta y al bajar la humedad la corriente disminuye.



Figura 13-3 Sensor de humedad YL-69
Fuente: (ARDUINO, 2017)

El sensor YL-68 posee dos placas en forma de punta, la señal que emite es una variación de intensidad según la humedad, la cual será interpretada por el módulo YL-38, que posee un comparador LM393SMD que servirá para convertir la señal que envíe el YL-68, este módulo emitirá una señal análoga de 0 a 5 V.

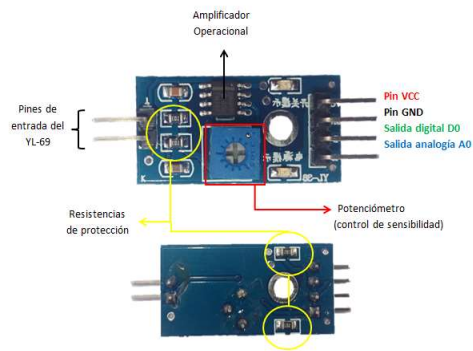


Figura 14-3 Conversor de sensor de humedad YL-38
Fuente: (ARDUINO, 2017)

Especificaciones:

- Voltaje de entrada: 3.3 a 5 VDC.
- Voltaje de salida: 0 a 4.2 V.
- Corriente 35mA.
- Salida analógica de 0-5 Voltios
- Salida digital, el nivel lógico puede ser ajustado.

3.6.3.5 Transmisor y sensor de pH – Sensor de pH-BTA Vernier

Este tipo de instrumentos poseen un sensor vidrio y un tubo de referencia. Este mide la actividad de iones de hidrogeno mediante la generación de una pequeña cantidad de tensión en el sensor y el tubo de referencia. Este sensor posee un circuito amplificador, el sensor produce un voltaje aproximadamente de 1.75 voltios a un valor de pH 7. El voltaje aumenta en 0.25 voltios por cada pH que disminuya.



Figura 15-3 Sensor de pH
Fuente: (VERNIER, 2017)

Especificaciones:

- Tipo: Cuerpo de policarbonato, sellado, lleno de gel, Ag/AgCl.
- Respuesta en el tiempo: 90% de lectura en un segundo.
- Diámetro: 12mm OD.
- Rango de temperatura: 5 a 80°C.
- Rango: 0-14 pH.
- Presición: +/- 0.2 unidades de pH.

3.6.3.6 Transmisor y Sensor de Conductividad Eléctrica – Sensor Con-BTA de Vernier

Este tipo de sensores mide la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica entre dos electrodos. La corriente fluye por transporte iónico, por lo tanto una concentración creciente de iones en la solución dará como resultados valores de conductividad más altos.



Figura 16-3 Sensor de conductividad eléctrica
Fuente: (VERNIER, 2017)

Especificaciones:

- Rango:
 - Rango bajo: 0 a 200 uS/cm
 - Rango medio: 0 a 2000 uS/cm.

- Rango alto: 0 a 20000 uS/cm
- Resolución:
 - Resolución baja: 0.1 uS/cm.
 - Resolución media: 1 uS/cm.
 - Resolución alta: 10 uS/cm.
- Precisión:
 - Presión de para rango bajos +/- 8% con calibración de fábrica.
 - Presión de para rango medios +/- 3% con calibración de fábrica.
 - Presión de para rango altos +/- 4% con calibración de fábrica.
- Tiempo de respuesta: 98% de la lectura escalada completa en 5 segundos, 100% de la escala completa en 15 segundos.
- Compensación de temperatura: automático de 5 a 35°C.
- Rango de temperatura: 0 a 80°C.
- Constante de la celda: 1.0 1/cm.
- Descripción: cuerpo ABS, Electrodoos paralelos de carbono (grafito).

3.6.4 Diseño de la arquitectura del sistema de control.

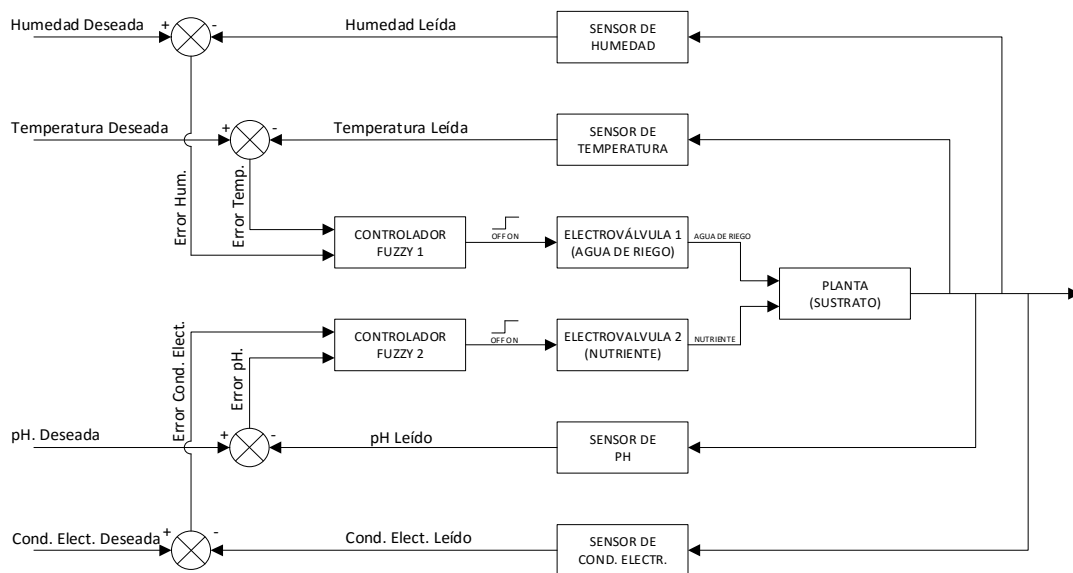


Figura 17-3 Arquitectura de control para el sistema de riego por goteo
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para realizar el diseño de la arquitectura de control, primero consideramos que va ser un controlador difuso, los sensores de temperatura y humedad del sustrato compondrán la salida 1 (agua de riego),

mientras que los sensores de conductividad eléctrica y pH del sustrato compondrán la salida 2 (nutriente). Por los tipos de señales a medir se utiliza un control proporcional difuso, ya que las señales de salidas sus respuestas no son tan rápidas, por lo que no requerimos un control más complejo. El tipo de motor de interferencia del controlador será con el algoritmo de interferencia de Mandami, ya que la tarjeta de control tiene librerías para este tipo de control difuso.

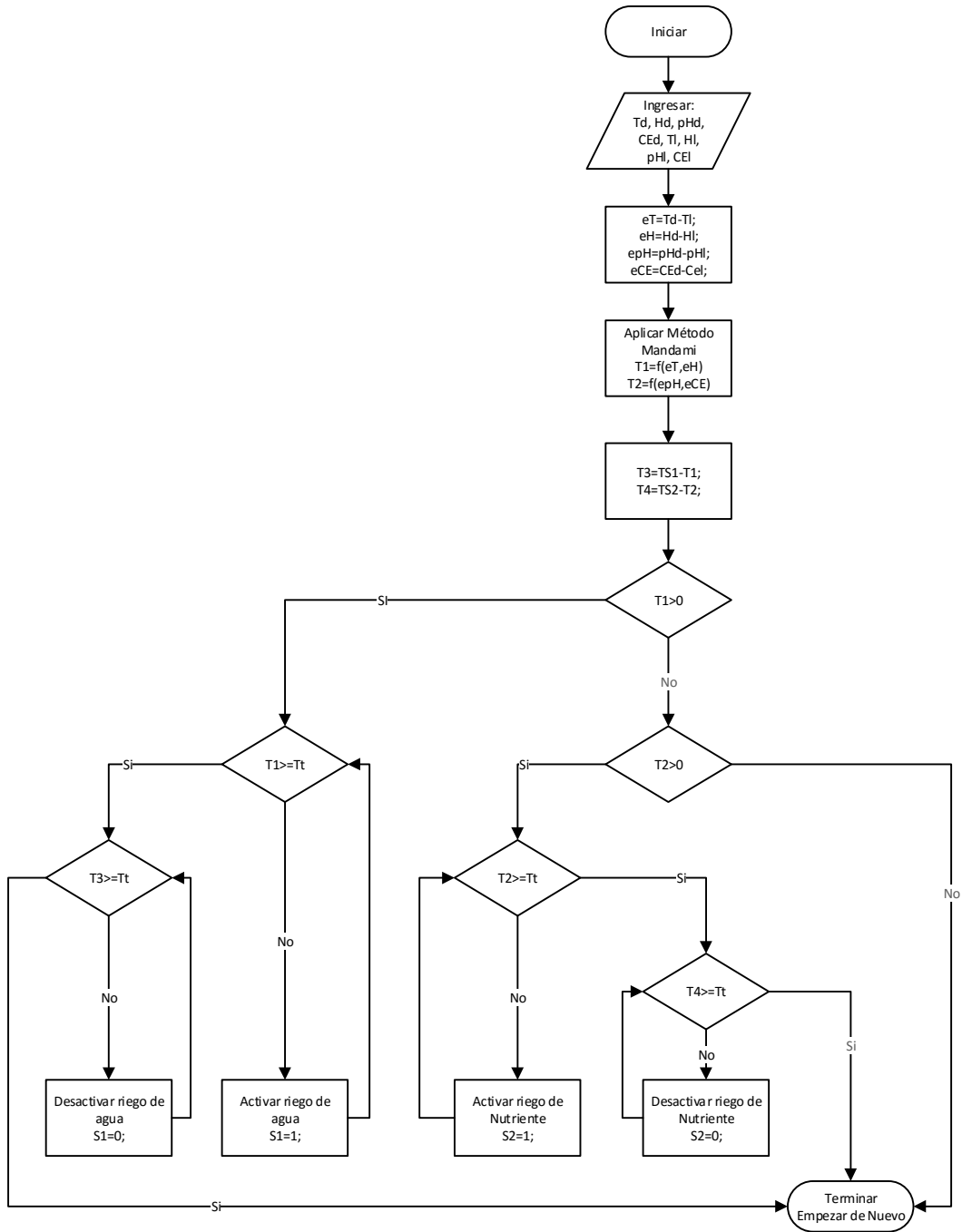


Figura 18-3 Diagrama de flujo del sistema de control de riego por goteo.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.6.5 Diseño del Controlador Difuso

Para realizar el diseño de controlador se debe considerar todas las partes del controlador difuso. Al utilizar el software Matlab para realizar las respectivas pruebas del diseño del controlador. Para luego implementarlo en nuestra tarjeta de control. Para realizar el respectivo diseño de nuestro controlador fuzzy, se debe considerar la experiencia de un experto de cuáles son los valores óptimos de las variables a medir.

Tabla 8-3 Variables de entrada optima del sistema

Variable de Medida del sustrato	Rango del sensor	Rango óptimo	Alcance óptimo
<i>Temperatura</i>	0 a 40 [°C]	21 a 27 [°C]	6 [°C]
<i>Humedad</i>	0 a 100 [%]	60 a 75 [%]	15 [%]
<i>pH</i>	0 a 14 [pH]	5.5 a 6.5 [pH]	1 [pH]
<i>Conductividad eléctrica</i>	0 a 20000 [uS/cm]	1500 a 3500 [uS/cm]	2000 [uS/cm]

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Las variables de entrada del controlador serán el error que será el resultado de la variable deseada menos la variable leída de cada sensor.

$$e_T = T_{SP} - T_L \quad (15)$$

Donde:

- e_T : Error de temperatura del sustrato
- T_{SP} : Temperatura deseada del sustrato.
- T_L : Temperatura leída del sustrato.

$$e_M = M_{SP} - M_L \quad (16)$$

Donde:

- e_M : Error de humedad del sustrato.
- M_{SP} : Humedad deseada del sustrato.
- M_L : Temperatura leída del sustrato.

$$e_N = N_{SP} - N_L \quad (17)$$

Donde:

- e_N : Error de pH del sustrato.
- N_{SP} : pH deseada del sustrato.
- N_L : pH leída del sustrato.

$$e_C = C_{SP} - C_L \quad (18)$$

Donde:

- e_C : Error de conductividad eléctrica del sustrato.
- C_{SP} : Conductividad eléctrica deseada del sustrato.
- C_L : Conductividad eléctrica leída del sustrato.

3.6.5.1 Diseño de las funciones de membresía:

Para nuestro diseño del controlador al tener definido las variables de entrada y de salida. Se debe tener en cuenta nuestras variables lingüísticas, para nuestro diseño consideramos las variables de entrada la temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica del sustrato, donde las dos primeras variables controlaran el tiempo de riego de agua y las dos últimas variables de entrada controlaran el tiempo de riego del nutriente.

Para realizar el control, se separará en dos controles donde las variables se definieron de la siguiente forma, el primero controlara el tiempo de riego de agua con las dos variables temperatura y humedad. Mientras que la segunda variable de control será el tiempo de riego del nutriente donde interviene el pH y la conductividad eléctrica.

- **Funciones de Membresía para el controlador difuso del KC-01:**

Se definió las variables lingüísticas de entrada en nuestros universos de discurso que son “**Error de temperatura del sustrato**” donde el rango del sensor es 0°C a 40°C (ver tabla 3.9), y entrada “**Error de humedad del sustrato**” donde el rango de medida del sensor es de 0% al 100% (ver tabla 3.10). Para luego diseñarlo en el software Matlab con la librería fuzzy de la misma. En los dos universos de discurso se dividió en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango.

Tabla 9-3 Descripción de los conjuntos difusos del error de temperatura del sustrato

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [°C]	Función de membresía
<i>Muy frío</i>	Error de temperatura del sustrato muy frío	[3 a 24]	Saturación
<i>Frío</i>	Error de temperatura del sustrato frío	[0 a 6]	Triangular
<i>Normal</i>	Error de temperatura del sustrato normal	[-3 a 3]	Triangular
<i>Caliente</i>	Error de temperatura del sustrato caliente	[-6 a 0]	Triangular
<i>Muy caliente</i>	Error de temperatura del sustrato muy caliente	[-24 a -3]	Hombro

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Tabla 10-3 Descripción de los conjuntos difusos del error de humedad del sustrato

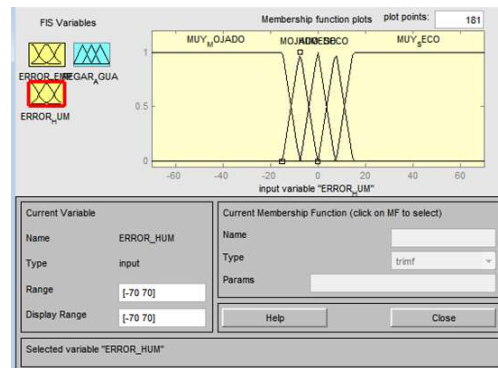
Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [%]	Función de membresía
<i>Muy seco</i>	Error de humedad del sustrato muy seco	[7.5 a 70]	Saturación
<i>Seco</i>	Error de humedad del sustrato seco	[0 a 15]	Triangular
<i>Húmedo</i>	Error de humedad del sustrato húmedo	[-7.5 a 7.5]	Triangular
<i>Mojado</i>	Error de humedad del sustrato mojado	[-15 a 0]	Triangular
<i>Muy mojado</i>	Error de humedad del sustrato muy mojado	[-70 a -7.5]	Hombro

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

El siguiente paso es diseñar en el software Matlab tanto “*error de temperatura del sustrato*” y “*error de humedad del sustrato*” (ver figura 3.20).



A) Funciones de pertenencia del error de temperatura del sustrato



B) Funciones de pertenencia del error de humedad del sustrato

Gráfica 1-3 Funciones de pertenencia del error de temperatura y error de humedad.

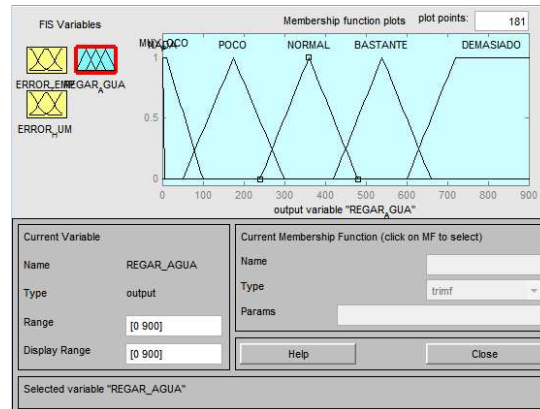
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Ahora se establece la variable lingüística de salida “*Regar agua*”; donde el rango será 0 segundos a 900 segundos, que estará definido en función del tiempo. Los tiempos de regar agua han sido conocidos con la prueba y error para satisfacer las necesidades de humedad y temperatura del sustrato óptimo.

Tabla 11-3 Definición de los conjuntos difusos de Regar agua

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [s]	Función de membresía
<i>Nada</i>	Regar agua nada	[0]	Singleton
<i>Muy poco</i>	Regar agua muy poco	[0 a 100]	Hombro
<i>Poco</i>	Regar agua poco	[0 a 300]	Triangular
<i>Normal</i>	Regar agua normal	[240 a 480]	Triangular
<i>Bastante</i>	Regar agua bastante	[420 a 660]	Triangular
<i>Demasiado</i>	Regar agua demasiado	[480 a 900]	Saturación

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)



Gráfica 2-3 Funciones de pertenencia de regar agua
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

- **Funciones de Membresía para el controlador difuso del KC-02:**

Ahora se realizará el segundo control, que estará definido por las siguientes variables. La primera variable lingüística es **“Error de pH del sustrato”**, se encuentra en el rango del sensor de 0 a 14 unidades de pH; mientras que la segunda variable es la **“Error de Conductividad eléctrica del sustrato”** el rango del sensor será de 0 a 20000 uS/cm.

Tabla 12-3 Definición de los conjuntos difusos de error de pH del sustrato.

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [pH]	Función de membresía
<i>Muy ácido</i>	Error de pH del sustrato muy ácido	[1 a 8]	Saturación
<i>Ácido</i>	Error de pH del sustrato ácido	[0 a 2]	Triangular
<i>Normal</i>	Error de pH del sustrato normal	[-0.5 a 0.5]	Triangular
<i>Alcalino</i>	Error de pH del sustrato alcalino	[-2 a 0]	Triangular
<i>Muy alcalino</i>	Error de pH del sustrato muy alcalino	[-8 a -1]	Hombro

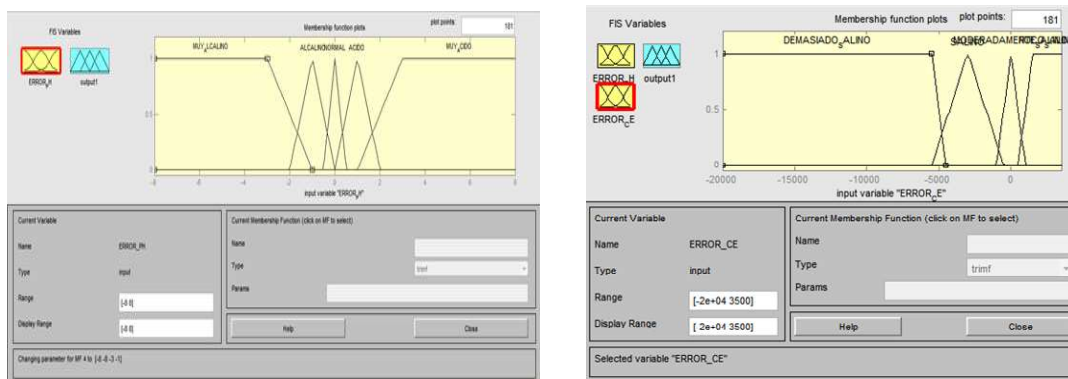
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Tabla 13-3 Definición de los conjuntos difusos de error de conductividad eléctrica del sustrato.

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [uS/cm]	Función de membresía
<i>Poco Salino</i>	Error de conductividad eléctrica del sustrato poco salino	[500 a 3500]	Saturación
<i>Moderadamente Salino</i>	Error de conductividad eléctrica del sustrato moderadamente salino	[-1000 a 1000]	Triangular
<i>Salino</i>	Error de conductividad eléctrica del sustrato salino	[-500 a -5500]	Triangular
<i>Demasiado Salino</i>	Error de conductividad eléctrica del sustrato demasiado salino	[-20000 a -4500]	Hombro

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Se los dividió al universo de discurso como se muestra en las tablas 12-3 y 13-3 como se muestra a continuación, de igual forma se lo implementa en el software Maltab las funciones de pertenencia como muestra la figura 3.22



A) Funciones de pertenencia del error de pH del sustrato

B) Funciones de pertenencia del error de conductividad eléctrica del sustrato

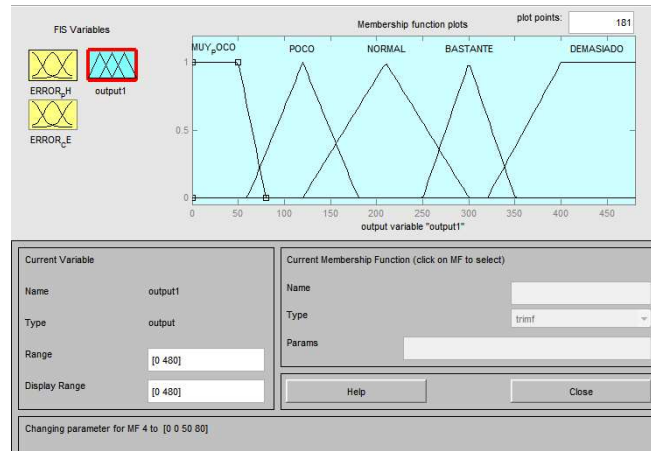
Gráfica 3-3 Funciones de pertenencia de error de pH y conductividad eléctrica del sustrato. Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Ahora se establece la variable lingüística de salida **“Regar nutriente”**; donde el rango será 0 segundos a 480 segundos, que estará definido en función del tiempo. Los tiempos de regar nutriente han sido conocidos con la prueba y error para satisfacer las necesidades de pH y conductividad eléctrica del sustrato óptimo.

Tabla 14-3 Definición de los conjuntos difusos de regar nutriente

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango [s]	Función de membresía
<i>Nada</i>	Regar nutriente nada	[0]	Singleton
<i>Muy poco</i>	Regar nutriente muy poco	[0 a 120]	Hombro
<i>Poco</i>	Regar nutriente poco	[0 a 180]	Triangular
<i>Normal</i>	Regar nutriente normal	[120 a 300]	Triangular
<i>Bastante</i>	Regar nutriente bastante	[250 a 350]	Triangular
<i>Demasiado</i>	Regar nutriente demasiado	[300 a 480]	Saturación

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)



Gráfica 4-3 Funciones de pertenencia de regar sustrato.
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.6.5.2 Creación de las bases de reglas:

Para realizar la construcción de las reglas, se lo realizó en el formato tipo Mandami. En el cuál se describe las dos tablas para escribir las reglas de los dos controladores Fuzzy.

Tabla 15-3 Tabla de reglas difusas para la salida de control KC-01

		ERROR DE TEMPERATURA				
		<i>Muy Frío</i>	<i>Frío</i>	<i>Normal</i>	<i>Caliente</i>	<i>Muy Caliente</i>
ERROR DE HUMEDAD	<i>Muy Seca</i>	Regar agua normal	Regar agua normal	Regar agua bastante	Regar agua bastante	Regar agua demasiado
	<i>Seca</i>	Regar agua poco	Regar agua poco	Regar agua normal	Regar agua bastante	Regar agua demasiado
	<i>Húmeda</i>	Regar agua nada	Regar agua nada	Regar agua poco	Regar agua normal	Regar agua bastante
	<i>Mojada</i>	Regar agua nada	Regar agua nada	Regar agua nada	Regar agua poco	Regar agua normal
	<i>Muy Mojada</i>	Regar agua nada	Regar agua nada	Regar agua nada	Regar agua muy poco	Regar agua poco

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Creación de las reglas del control difuso 1, KC-01:

1. Si (*Temperatura es muy frío*) y (*Humedad es muy seca*) entonces (*Regar agua es normal*).
2. Si (*Temperatura es muy frío*) y (*Humedad es seca*) entonces (*Regar agua es poco*).
3. Si (*Temperatura es muy frío*) y (*Humedad es húmedo*) entonces (*Regar agua es nada*).
4. Si (*Temperatura es muy frío*) y (*Humedad es mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).

5. Si (*Temperatura es muy frío*) y (*Humedad es muy mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).
6. Si (*Temperatura es frío*) y (*Humedad es muy seco*) entonces (*Regar agua es normal*).
7. Si (*Temperatura es frío*) y (*Humedad es seco*) entonces (*Regar agua es poco*).
8. Si (*Temperatura es frío*) y (*Humedad es húmedo*) entonces (*Regar agua es nada*).
9. Si (*Temperatura es frío*) y (*Humedad es mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).
10. Si (*Temperatura es frío*) y (*Humedad es muy mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).
11. Si (*Temperatura es normal*) y (*Humedad es muy seco*) entonces (*Regar agua es bastante*).
12. Si (*Temperatura es normal*) y (*Humedad es seco*) entonces (*Regar agua es normal*).
13. Si (*Temperatura es normal*) y (*Humedad es húmedo*) entonces (*Regar agua es poco*).
14. Si (*Temperatura es normal*) y (*Humedad es mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).
15. Si (*Temperatura es normal*) y (*Humedad es muy mojada*) entonces (*Regar agua es nada*).
16. Si (*Temperatura es caliente*) y (*Humedad es muy seco*) entonces (*Regar agua es bastante*).
17. Si (*Temperatura es caliente*) y (*Humedad es seco*) entonces (*Regar agua es bastante*).
18. Si (*Temperatura es caliente*) y (*Humedad es húmedo*) entonces (*Regar agua es normal*).
19. Si (*Temperatura es caliente*) y (*Humedad es mojada*) entonces (*Regar agua es poco*).
20. Si (*Temperatura es caliente*) y (*Humedad es muy mojada*) entonces (*Regar agua es muy poco*).
21. Si (*Temperatura es muy caliente*) y (*Humedad es muy seco*) entonces (*Regar agua es demasiado*).
22. Si (*Temperatura es muy caliente*) y (*Humedad es seco*) entonces (*Regar agua es demasiado*).
23. Si (*Temperatura es muy caliente*) y (*Humedad es húmedo*) entonces (*Regar agua es bastante*).
24. Si (*Temperatura es muy caliente*) y (*Humedad es mojada*) entonces (*Regar agua es normal*).
25. Si (*Temperatura es muy caliente*) y (*Humedad es muy mojada*) entonces (*Regar agua es poco*).

Ahora se construye las tablas para el control KC-02 de controlador difuso 2.

1. Si (*pH es muy ácido*) y (*Conductividad eléctrica es poco salino*) entonces (*Regar nutriente es muy poco*).
2. Si (*pH es muy ácido*) y (*Conductividad eléctrica es moderadamente salino*) entonces (*Regar nutriente es nada*).
3. Si (*pH es muy ácido*) y (*Conductividad eléctrica es salino*) entonces (*Regar nutriente es poco*).
4. Si (*pH es muy ácido*) y (*Conductividad eléctrica es demasiado salino*) entonces (*Regar nutriente es nada*).
5. Si (*pH es ácido*) y (*Conductividad eléctrica es poco salino*) entonces (*Regar nutriente es poco*).
6. Si (*pH es ácido*) y (*Conductividad eléctrica es moderadamente salino*) entonces (*Regar nutriente es nada*).
7. Si (*pH es ácido*) y (*Conductividad eléctrica es salino*) entonces (*Regar nutriente es nada*).

Tabla 16-3 Tabla de reglas difusas para la salida de control KC-02

		ERROR DE pH				
		<i>Muy acido</i>	<i>Acido</i>	<i>Normal</i>	<i>Alcalino</i>	<i>Muy alcalino</i>
ERROR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	<i>Poco Salino</i>	Regar nutriente muy poco	Regar nutriente poco	Regar nutriente normal	Regar nutriente bastante	Regar nutriente demasiado
	<i>Moderadamente Salino</i>	Regar nutriente nada	Regar nutriente nada	Regar nutriente poco	Regar nutriente normal	Regar nutriente bastante
	<i>Salino</i>	Regar nutriente nada	Regar nutriente nada	Regar nutriente muy poco	Regar nutriente poco	Regar nutriente normal
	<i>Demasiado Salino</i>	Regar nutriente nada	Regar nutriente nada	Regar nutriente nada	Regar nutriente nada	Regar nutriente muy poco

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

8. Si (*pH* es *acido*) y (*Conductividad eléctrica* es *demasiado salino*) entonces (*Regar nutriente* es *nada*).
9. Si (*pH* es *normal*) y (*Conductividad eléctrica* es *poco salino*) entonces (*Regar nutriente* es *normal*).
10. Si (*pH* es *normal*) y (*Conductividad eléctrica* es *moderadamente salino*) entonces (*Regar nutriente* es *poco*).
11. Si (*pH* es *normal*) y (*Conductividad eléctrica* es *salino*) entonces (*Regar nutriente* es *muy poco*).
12. Si (*pH* es *normal*) y (*Conductividad eléctrica* es *demasiado salino*) entonces (*Regar nutriente* es *nada*).
13. Si (*pH* es *alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *poco salino*) entonces (*Regar nutriente* es *bastante*).
14. Si (*pH* es *alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *moderadamente salino*) entonces (*Regar nutriente* es *normal*).
15. Si (*pH* es *alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *salino*) entonces (*Regar nutriente* es *poco*).
16. Si (*pH* es *alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *demasiado salino*) entonces (*Regar nutriente* es *nada*).
17. Si (*pH* es *muy alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *poco salino*) entonces (*Regar nutriente* es *demasiado*).
18. Si (*pH* es *muy alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *moderadamente salino*) entonces (*Regar nutriente* es *bastante*).

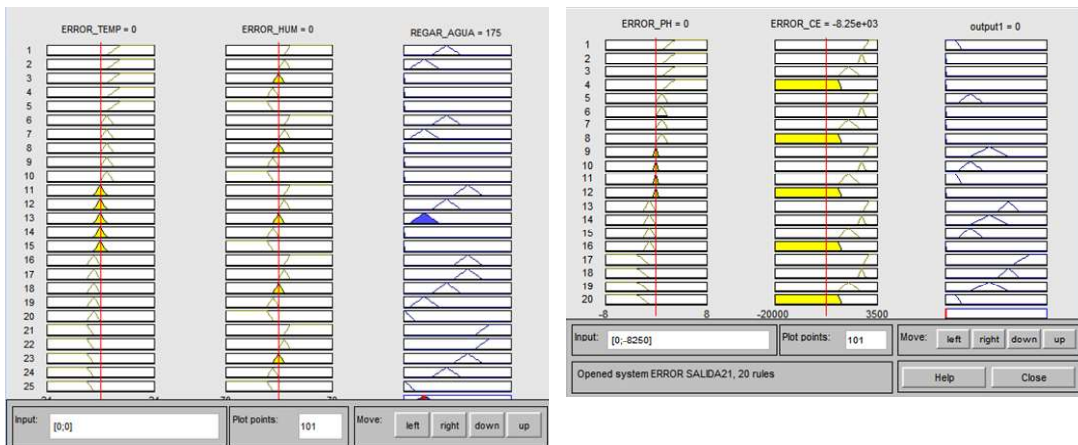
19. Si (*pH* es *muy alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *salino*) entonces (*Regar nutriente* es *normal*).

20. Si (*pH* es *muy alcalino*) y (*Conductividad eléctrica* es *demasiado salino*) entonces (*Regar nutriente* es *muy poco*).

Para la creación de las reglas se ocupa el software Matlab, donde se agrega las reglas de la base de conocimientos, el motor de inferencia será de tipo Mandami, por lo que ocupará como indica la imagen 2.22 utilizará los máximos y mínimos para evaluar las reglas y luego utilizar la operación de unión de conjuntos difusos, para luego encontrar los consecuentes.

3.6.5.3 Defusificación

El objetivo de la defusificación es obtener un valor no difuso, es decir un solo valor de salida, el método generalmente usado por Mandami en el método de centroide. Para realizar este método también se ocupó el software computacional Matlab. A continuación, se muestra el diseño realizado en este programa.

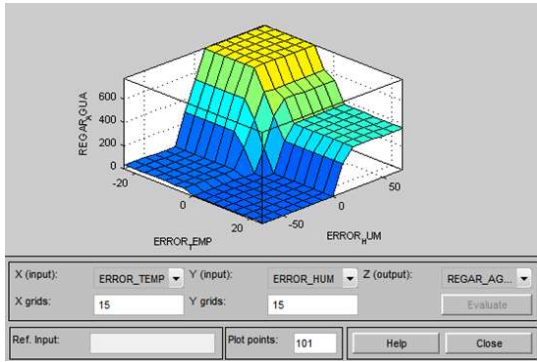


A) Defusificación de las variables de entrada de controlador difuso 1

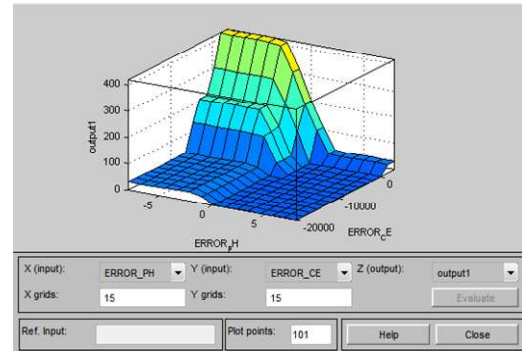
B) Defusificación de las variables de entrada de controlador difuso 2

Gráfica 5-3 Defusificación de las variables de entrada de controlador difuso 1 y 2.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)



A) Superficie de control de salida 1



B) Superficie de control de salida 2

Gráfica 6-3 Superficie de control de regar agua y regar nutriente

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.6.6 Diseño e Implementación de una Interfaz Hombre-Máquina.

La interfaz hombre-máquina, forma parte del sistema de control, ya que permite una visualización de las variables de control, así como manipular ciertos actuadores u operar; según la ISO 9241-110, el termino interfaz de usuario se define como todas las partes de un sistema interactivo (software y hardware) que proporcionan la información y control necesarios para que el usuario lleve a cabo tarea con el sistema interactivo.

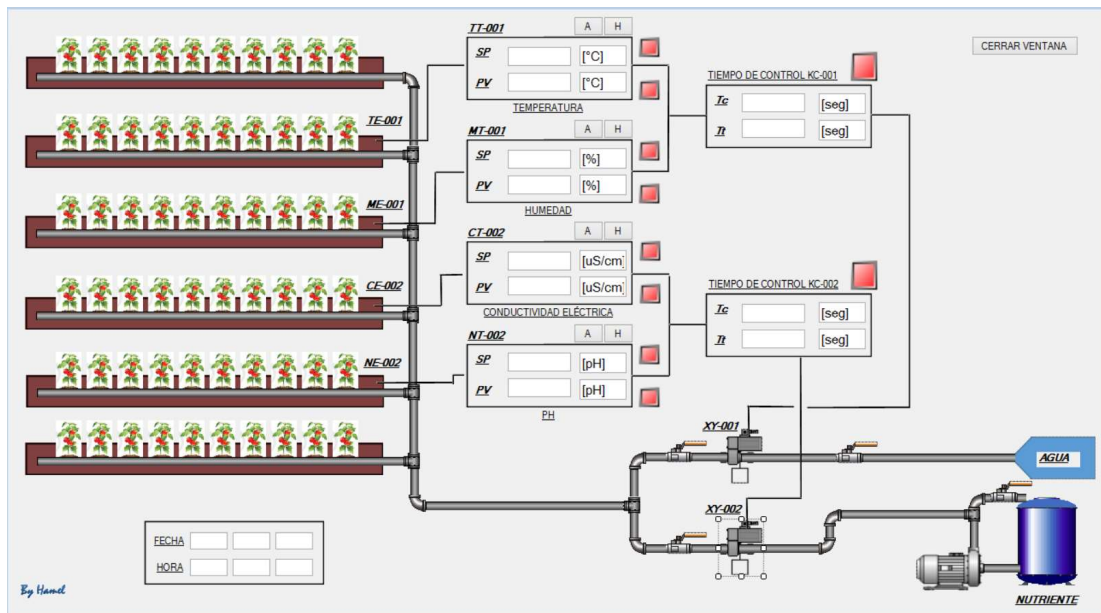
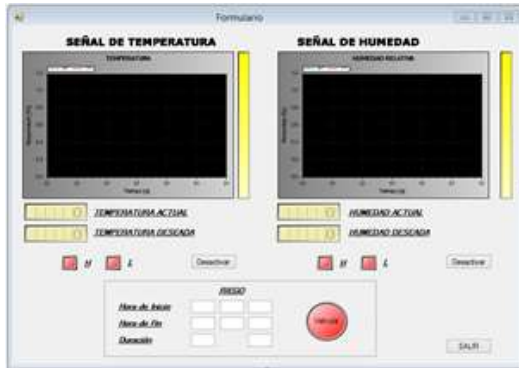


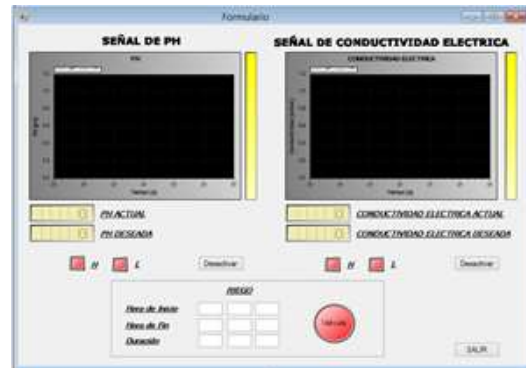
Figura 19-3 Pantalla principal del proceso del Cultivo de Tomate Riñón Variedad Daniela.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

El software utilizado para realizar la interfaz hombre máquina debe ser compatible con el protocolo de comunicación Modbus RTU; ocupamos el software monitoriza, ya que posee el número de tags suficientes para leer todas las variables necesarias.



A) Pantalla para visualización de Temperatura y Humedad del sustrato

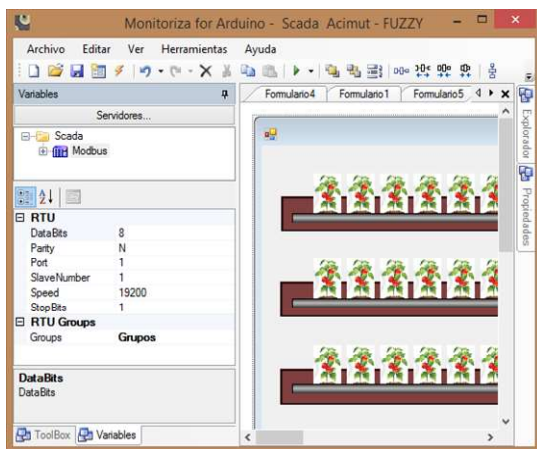


B) Pantalla para visualización de pH y Conductividad Eléctrica del sustrato

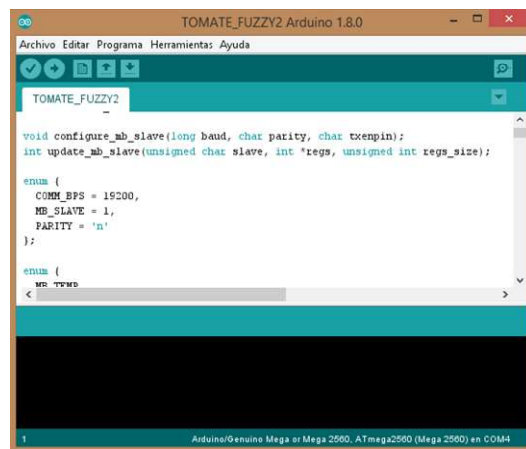
Figura 20-3 Pantallas de Visualización de variables del sustrato.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Monitoriza nos permite crear soluciones para la captura de información en procesos industriales o de cualquier otro ámbito. Con esa información se retroalimenta el proceso y se emplea como ayuda en la toma de decisiones. La versión de monitoriza que ocupamos es “Monitoriza para Arduino”, la ventaja es que no tiene limitaciones en el número de variables y el número de clientes; su desventaja es que solo es compatible con equipos Arduinos.



A) Configuración de los parámetros de comunicación del Monitoriza para el HMI

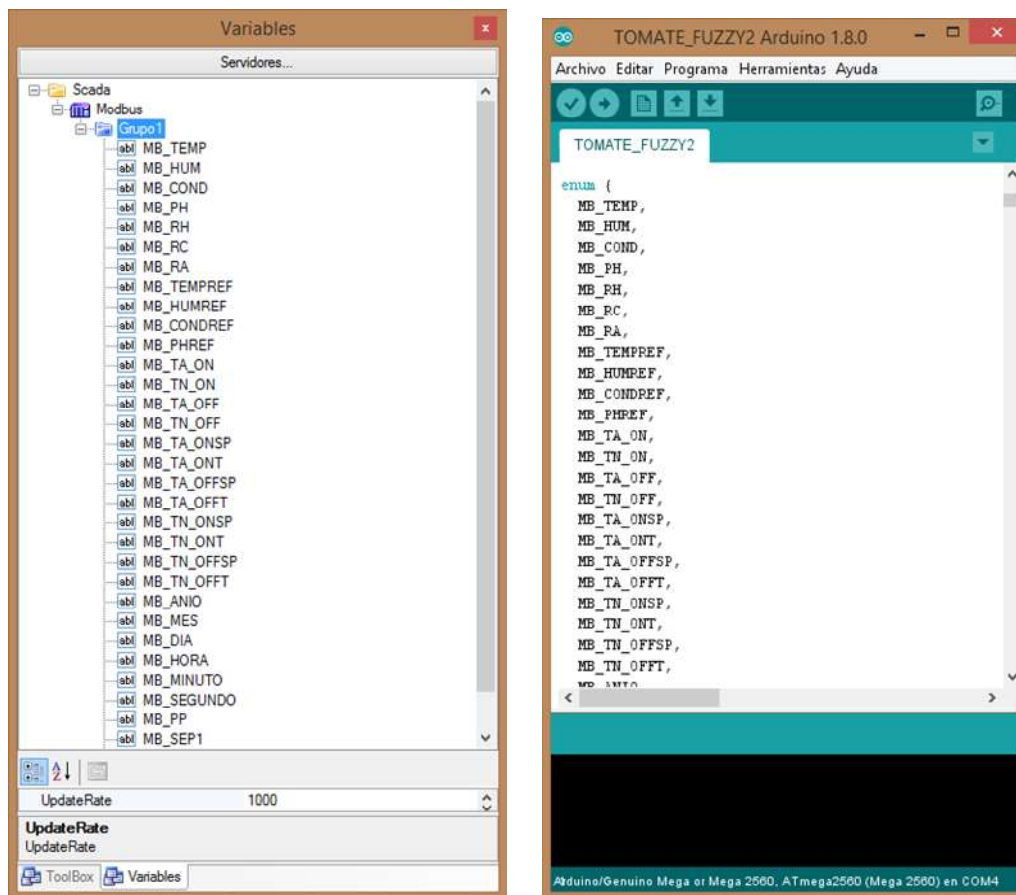


B) Configuración de los parámetros de comunicación del Arduino para la tarjeta de control

Figura 21-3 Configuración de los parámetros de comunicación del HMI y la tarjeta de control

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para establecer la comunicación entre la tarjeta de control y el HMI, se debe configurar los parámetros en el software monitoriza, y en la tarjeta Arduino, con los mismos parámetros, de igual forma se debe declarar los mismos registros.



A) Configuración de los registros de comunicación del Monitoriza para el HMI

B) Configuración de los registros de comunicación del Arduino para la tarjeta de control

Figura 22-3 Configuración de los registros de comunicación del HMI y la tarjeta de control.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.6.7 Diseño e Implementación de una Base de Datos.

Para poder realizar el análisis de los datos, primero se almacenan para luego hacer el estudio de las variables del proceso, que se ha obtenido mediante el control Fuzzy. Para poder cumplir con este requerimiento los datos obtenidos se agregan en una base de datos.

Para realizar nuestra base de datos, se implementó un servidor de base de datos con un servidor HTTP, de esta manera se podrá usar de una manera más sencilla y aplicable nuestra base no solo para tener la información dentro de un computador, así poder exportar los datos hacia la web.

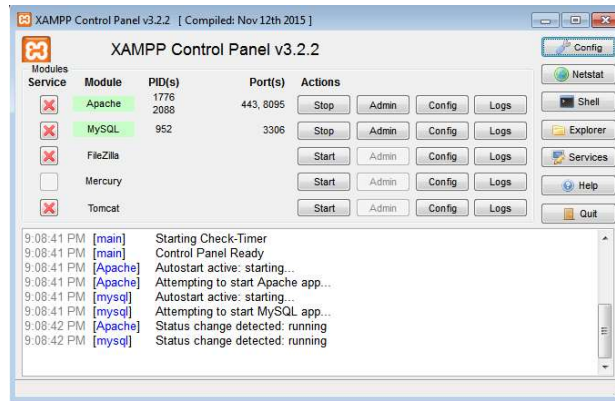


Figura 23-3 Panel de control del XAMP
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

XAMPP posee diversas aplicaciones de servidores de base de datos para usarlas con distintos sistemas operativos, para poder gestionar nuestra base de datos se ocupa phpMyAdmin, en el cual se utiliza también para manejar archivos php.

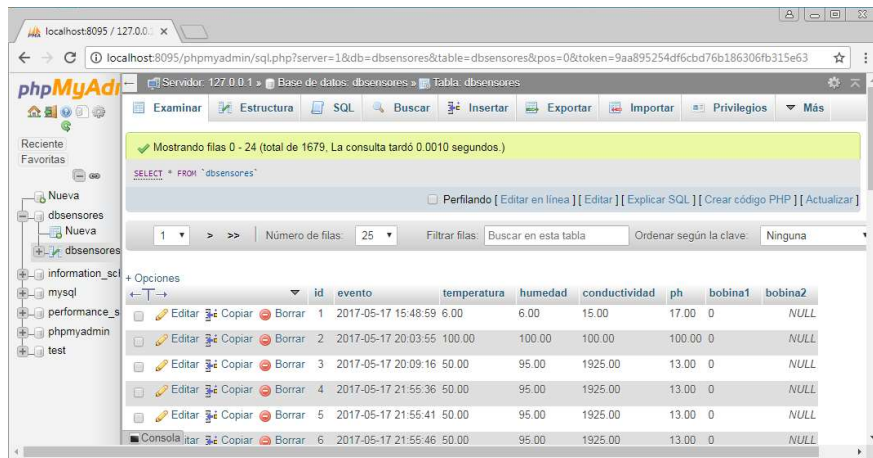


Figura 24-3 Base de datos implementado en phpMyAdmin.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Para poder comunicarnos con la base de datos, primeramente, se envían los datos a través de la Ethernet shield de Arduino, que funciona como cliente-servidor, enviamos en la red los datos necesarios, formamos un programa html, para la visualización de los datos, y mediante un programa en php adquirimos los datos de la página html, el programa php debe tener la conexión hacia el servidor de la base de datos.

```

1 <?php
2 $dbhost = "localhost";
3 $dbuser = "root";
4 $dbpass = "";
5 $dbname = "dbsensores";
6 /*$con = mysqli_connect($dbhost,$dbuser,$dbpass,$dbname);*/
7 $conexion = mysqli_connect($dbhost,$dbuser,$dbpass);
8 $seleccion = mysqli_select_db($conexion, $dbname);
9 /*if ($seleccion)
10 {
11     echo "Conectado si";
12 } else {
13     echo "que pena";
14 }*/
15
16

```

A) Programa en php para la conexión hacia la base de datos

```

#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

byte mac[] = { 0x0E, 0x0A, 0x0E, 0x0E, 0xEF, 0xED };
byte ip[] = { 192, 168, 1, 102 };
byte servidor[] = { 192, 168, 1, 103 };
}
EthernetClient cliente;
EthernetServer server(8095);

```

B) Programa en arduino para la conexión hacia el servidor

Figura 25-3 Programa para almacenar en la base de datos.
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

3.6.8 Implementación del sistema de control.

El siguiente paso es implementar en la placa de control de Arduino el controlador diseñado y la interpretación de las salidas, para la activación y desactivación de los solenoides; para eso se verá un breve rasgo de los códigos a usar para el controlador difuso.

Arduino ocupa el proceso de MAX y MIN y mínimo Mandami para la interferencia y la composición; ocupa el Centro de Área para la defuzzificación. En la librería de Arduino, se nombra cierta escritura que se utiliza en el código de la programación, como son:

- **Fuzzy object:** incluye todos los objetos del sistema fuzzy, como conjuntos difusos, las entradas y salidas de las variables lingüísticas, entre otros.

```
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();
```

- **Fuzzy Input object:** Asocia todas las entradas que pertenecen al mismo dominio del conjunto difuso.

```
FuzzyInput* temperatura = new FuzzyInput(1);
temperatura->addFuzzySet(tmuyfrio);
fuzzy->addFuzzyInput(temperatura);
```

- **Fuzzy Output object:** Asocia todas las salidas que pertenecen al mismo dominio del conjunto difuso.

```

FuzzyOutput* r_agua = new FuzzyOutput(1);
FuzzySet* muypoco1 = new FuzzySet(0, 0, 10, 100);
r_agua->addFuzzySet(muypoco1);
fuzzy->addFuzzyOutput(r_agua);

```

- **Fuzzy Set object:** sirve para modelar las funciones de membresía; trapezoidal, triangular y singleton. Se declaran los puntos base a, b, c, d.

```

FuzzySet(float a, float b, float c, float d);
FuzzySet* tmuyfrio = new FuzzySet(3, 9, 24, 24);

```

- **FuzzyRule Object:** Sirve para declarar las reglas del sistema de control difuso.

```

FuzzyRule fr= new FuzzyRule(ID, antecedente, consecuente);
FuzzyRule* fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, tmuyfrio_and_hmuyseca, then_ragua1);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

```

- **FuzzyRuleAntecedent object:** es el responsable de componer el antecedente de FuzzyRule Object en la expresión. Para construir las expresiones existen varias formas; pero se nombra los dos que se puede utilizar en la programación ya que se tratan de dos entradas.

“Si (Temperatura es muy frío) y (Humedad es muy seco) entonces (Regar agua es normal)”

```

FuzzyRuleAntecedent* tmuyfrio_and_hmuyseca = new FuzzyRuleAntecedent();
tmuyfrio_and_hmuyseca->joinWithAND(tmuyfrio,hmuyseca);

```

“Si (Temperatura es muy frío) o (Humedad es muy seco) entonces (Regar agua es normal)”

```

FuzzyRuleAntecedent* tmuyfrio_or_hmuyseca = new FuzzyRuleAntecedent();
tmuyfrio_or_hmuyseca->joinWithOR(tmuyfrio,hmuyseca);

```

- **FuzzyRuleConsecuente object:** es el responsable de componer el consecuente de FuzzyRule Object en la expresión.

“Si (Temperatura es muy frío) y (Humedad es muy seco) entonces (Regar agua es normal)”

```

FuzzyRuleConsequent* then_ragua1 = new FuzzyRuleConsequent();
then_ragua1->addOutput(normal1);

```

Para poder realizar el control las tarjetas y la interfaz de potencia se lo coloco en un tablero con las fuentes de energía y elementos de protección necesarios. Para establecer la si el controlador es similar al de diseño se lo implementa en la tarjeta de control y se lo compará con la salida del controlador con la del diseño. Se realiza la adquisición de datos y así evaluar la salida del controlador.

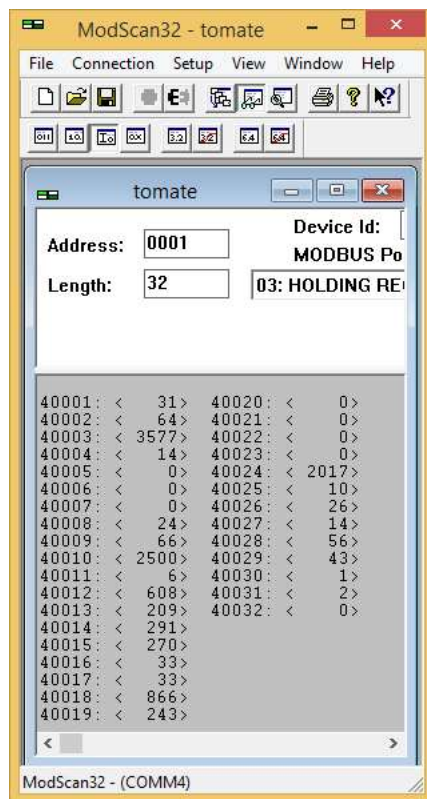


Figura 26-3 Muestra de los datos de proceso en Modscan
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

A continuación, los registros de importancia:

- 40001: 31 Señal de temperatura [°C]
- 40002: 64 Señal de Humedad [%]
- 40003: 3577 Señal de Conductividad Electrica [uS/cm]
- 40004: 14 Señal de pH [pH]
- 40008: 24 Temperatura deseada [°C]
- 40009: 66 Humedad deseada [%]
- 40010: 2500 Conductividad Eléctrica deseada [uS/cm]
- 40011: 6 pH deseado [pH]
- 40012: 608 Salida del tiempo de riego de agua [segundos]
- 40013: 209 Salida del tiempo de riego de nutriente [segundos]

Ahora se ocupa las siguientes ecuaciones:

$$e_T = T_{SP} - T_L \quad (15)$$

$$e_M = M_{SP} - M_L \quad (16)$$

$$e_N = N_{SP} - N_L \quad (17)$$

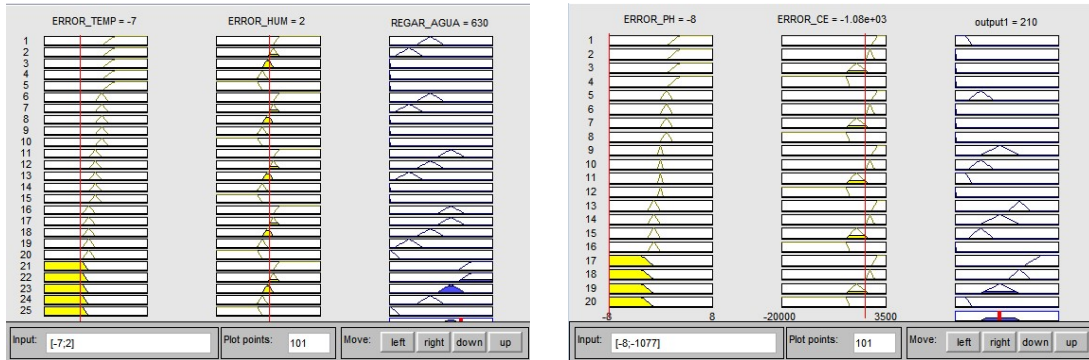
$$e_C = C_{SP} - C_L \quad (18)$$

$$e_T = 24 - 31 = -7$$

$$e_M = 66 - 64 = 2$$

$$e_N = 6 - 14 = -8$$

$$e_C = 2500 - 3577 = -1077$$



A) Salida del controlador difuso 1 = 630 segundos

B) Salida del controlador difuso 2 = 210 segundos

Gráfica 7-3 Tiempos de salida de los controladores de diseño.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Estos datos se lo introducen en el diseño y se lo comparara con el real: la salida de diseño para riego de agua: 630 seg y la salida de diseño para riego de nutriente: 210 seg. Observamos que la diferencia entre la salida del controlador y la del diseño de riego de agua es de 22 segundos; mientras que la de riego de nutriente es de 1 segundo.



Figura 27-3 Visualización de los datos de proceso a través de la red

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

CAPITULO IV

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

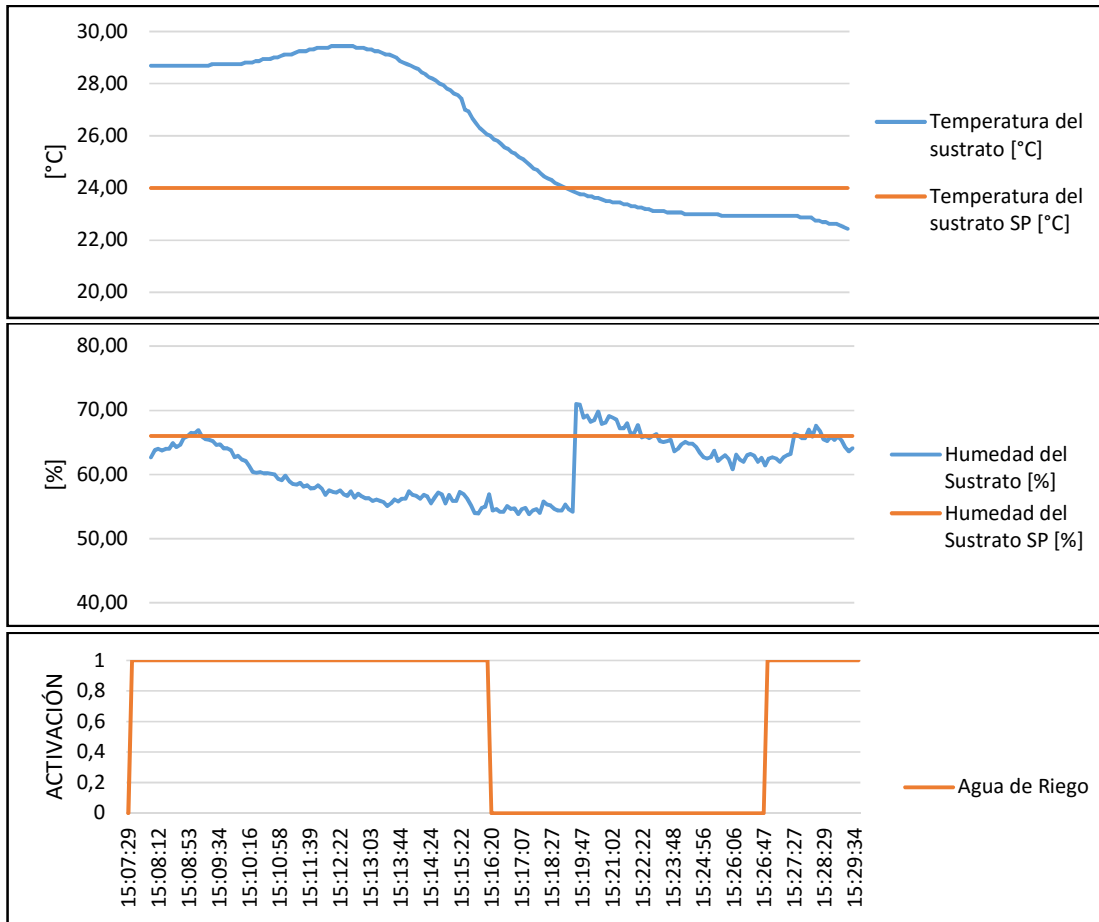
4.1. Resultados y Análisis

Para poder realizar un análisis de los resultados, se analizó las gráficas adquiridas desde la base de datos, primero el controlador de tiempo 1 “KC-01”, este controlador dependerá de las variables de entrada temperatura y humedad del sustrato, para poder realizar este experimento, apagamos el control y se esperó hasta las tres de la tarde para encenderlo, la temperatura ambiente dentro del invernadero estaba sobre los 30°C a 35°C. La temperatura del sustrato estaba en 30°C promedio y la humedad del sustrato cerca de lo normal 61%.



Fotografía 1-4 Medición de temperatura del sustrato
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Se analiza alrededor de 180 elementos adquiridos de la base de datos, que corresponde a los 900 segundos que suman el tiempo de encendido y el tiempo de apagado para que el controlador pueda realizar alguna acción, cada muestra se toma cada 5 segundos, según la programación de la tarjeta de comunicación hacia el servidor.



Gráfica 1-4 Muestra de datos del controlador de diseño 1 en 900 segundos
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

La temperatura del sustrato deseada en el controlador está en los 24°C y la humedad del sustrato deseada de 66%. Para analizar los datos se lo realiza en un transcurso de 900 segundos (15 minutos). Con estos datos se observa que la salida del controlador dio aproximadamente 560 segundos para alto (9 minutos con 20 segundos) y 340 segundos para bajo (5 minutos con 40 segundos), con un margen de error del tiempo de +/- 10 segundos. Donde se observa un descenso abrupto de la temperatura leída cercana a la deseada; mientras que la humedad del sustrato al final del transcurso del tiempo se mantiene cerca de la deseada.

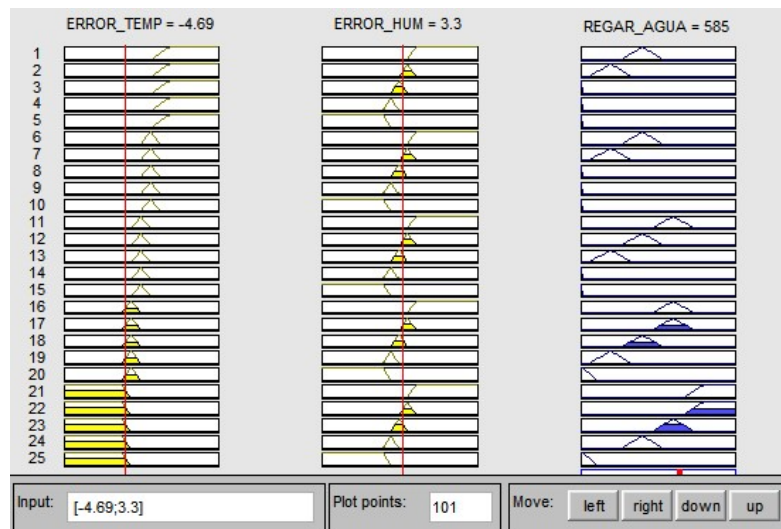
Tabla 1-4 Análisis de los datos del controlador de diseño 1 en 900 segundos.

Tiempo	Temperatura Deseada	Humedad Deseada	Temperatura Leída	Humedad Leída	Error de Temperatura	Error de Humedad	Riego de Agua
15:07:29	24°C	66%	28.69°C	62.7%	-4.69°C	+3.3%	OFF
15:07:34	24°C	66%	28.69°C	63.8%	-4.69°C	+2.2%	EN
15:16:15	24°C	66%	25.87°C	54.6%	-1.87°C	+11.4%	ON

15:16:20	24°C	66%	25.81°C	54.2%	-1.81°C	+11.8%	OFF
15:21:50	24°C	66%	23.31°C	66.5 %	+0.69°C	-0.5%	OFF

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

En este transcurso de tiempo se tiene un máximo de temperatura de 29.44°C a las 15:11:50, y un máximo de humedad de 71% a las 15:19:21. A continuación mostramos el diseño del controlador en Matlab con los datos ingresados del error, se puede observar que la respuesta de tiempo es casi similar a los 560 segundos, ya que en Matlab la respuesta sale 585 segundos, esto quiere decir que el tiempo de respuesta del controlador está dentro de los 5 segundos.



Gráfica 2-4 Defusificación de las entradas con el controlador de diseño 1.

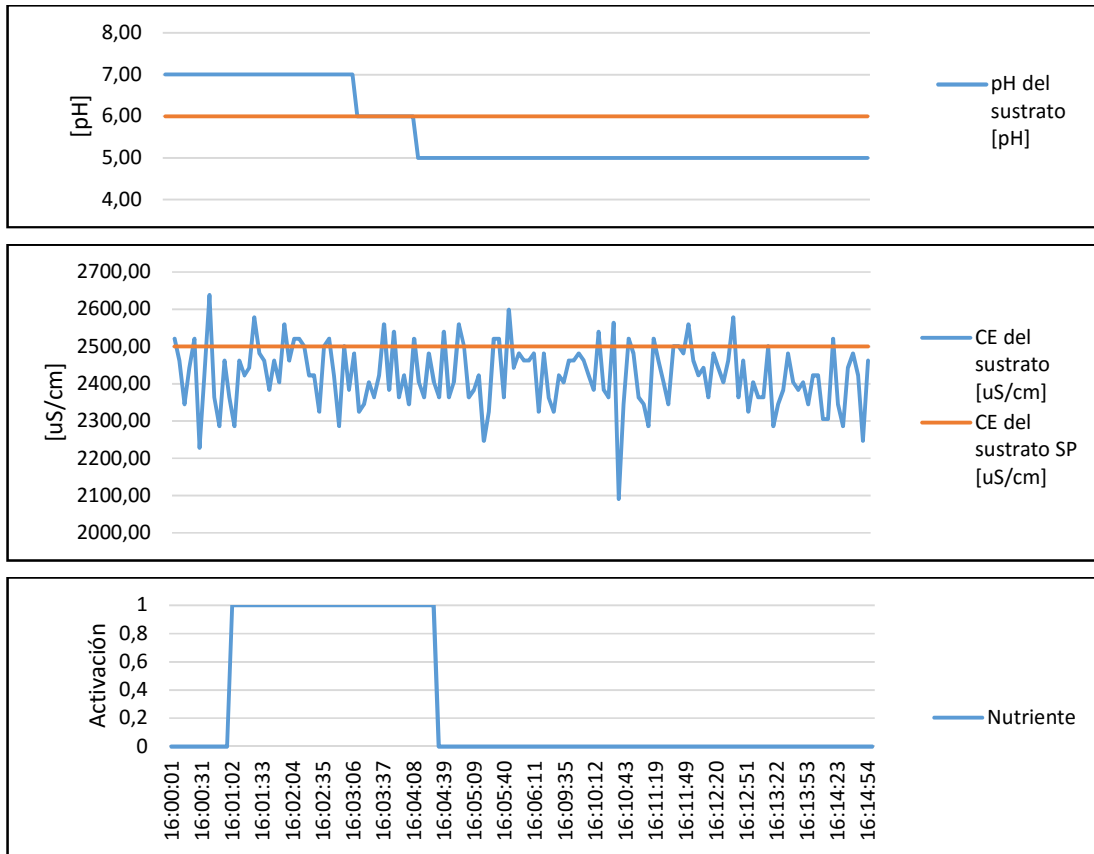
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

A continuación, se analiza el controlador KC-02, las variables de entrada son el pH y la conductividad eléctrica del sustrato, y su salida es el nutriente. Pero primero se debe mencionar que el pH del agua en forma líquida es de 6 pH y su conductividad promedio es de 1000 a 1500 uS/cm, mientras que del nutriente en forma líquida tiene un pH de 4.5 a 5.5 unidades, la conductividad eléctrica está entre 1500 a 2500 uS/cm; esto quiere decir que el nutriente en su forma disuelta en el tanque con una proporción de 15-20 cucharadas en un tanque de 60 litros se encuentra ligeramente ácido y moderadamente salino. Mientras que el agua de riego se encuentra con pH normal y bajo en sales. Es decir que el agua de riego también afecta a la conductividad eléctrica y al pH en el sustrato. El agua sirve para bajar la salinidad del sustrato que con la suficiente humedad para poder estar con unos parámetros adecuados de salinidad en el suelo. Por eso el control KC-02 con la conductividad eléctrica solo funciona cuando se encuentra bajo en sales y debe depender de la cantidad de pH en alto. Al tener en cuenta esta información en el control siempre funcionara primero el controlador “KC-01” hasta que satisfaga sus necesidades y luego el controlador KC-02. Para realizar la medición del nutriente tuvo que realizarse una recirculación, para volver a mezclar la solución.



Fotografía 2-4 Medición del pH del Nutriente
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

De igual forma se va realizar el mismo procedimiento, se va conocer el tiempo en un rango de 480 segundos (8 minutos), que es el tiempo máximo considerado para el riego de pH, adicional la temperatura del liquido también afecta a la medición del pH.



Gráfica 3-4 Muestra de datos del controlador de diseño 2 en 480 segundos
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

El pH deseado en el controlador KC-02 está en los 6 pH deseados y la conductividad eléctrica deseada de 2500 uS/cm. Para analizar los datos se lo realiza en un transcurso de 480 segundos (8

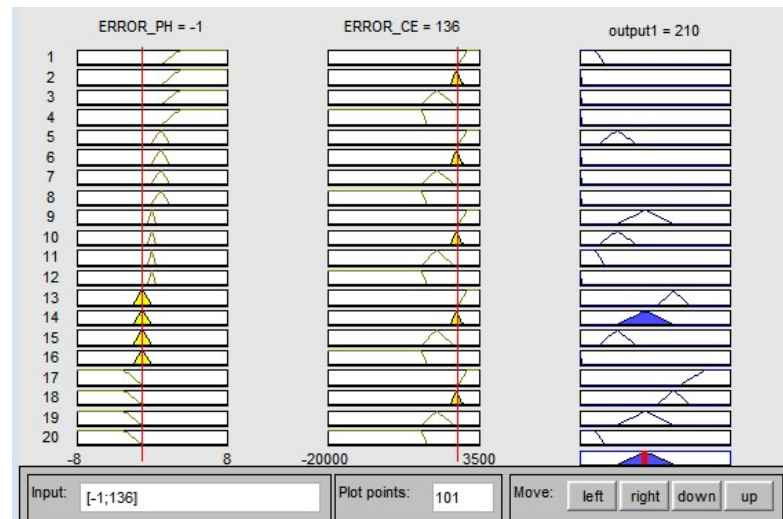
minutos). Con estos datos observamos que la salida del controlador dio aproximadamente 206 segundos para alto (3 minutos con 26 segundos) y 274 segundos para bajo (5 minutos con 54 segundos), con un margen de error del tiempo de +/- 10 segundos.

Tabla 2-4 Análisis de los datos del controlador de diseño 2 en 480 segundos.

Tiempo	pH Deseado	Conductividad Eléctrica Deseada	pH Leído	Conductividad Eléctrica Leído	Error de pH	Error de Conductividad Eléctrica	Riego de Nutriente
16:00:57	6 pH	2500 uS/cm	7 pH	2364 uS/cm	-1 pH	+136 uS/cm	OFF
16:01:02	6 pH	2500 uS/cm	7 pH	2286 uS/cm	-1 pH	+214 uS/cm	ON
16:04:28	6 pH	2500 uS/cm	5 pH	2404 uS/cm	+2 pH	+96 uS/cm	ON
16:04:34	6 pH	2500 uS/cm	5 pH	2364 uS/cm	+2 pH	+136 uS/cm	OFF
16:10:32	6 pH	2500 uS/cm	5 pH	2540 uS/cm	+2 pH	-40 uS/cm	OFF

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

En este transcurso de tiempo se observa que el pH se mantiene en 5 unidades, ya que también bajo la temperatura ambiente. La conductividad eléctrica aumento porque el nutriente es moderadamente salino y se mantiene en un rango muy pequeño. Como observamos en la siguiente figura la salida del controlador es similar al de diseño.



Gráfica 4-4 Defusificación de las entradas con el controlador de diseño 2.

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Se observa los errores se acercan al 0 cuando funciona el control, pero la temperatura ambiente afecta significativamente a la temperatura del sustrato y a todas sus variables. Los tiempos de respuesta del controlador son efectivos, ya que da una respuesta óptima al final del transcurso del periodo de cada controlador. El pH y la conductividad eléctrica también son afectadas por el agua de riego. A continuación, se analizó la variación del error de las variables de entrada y el tiempo de riego del

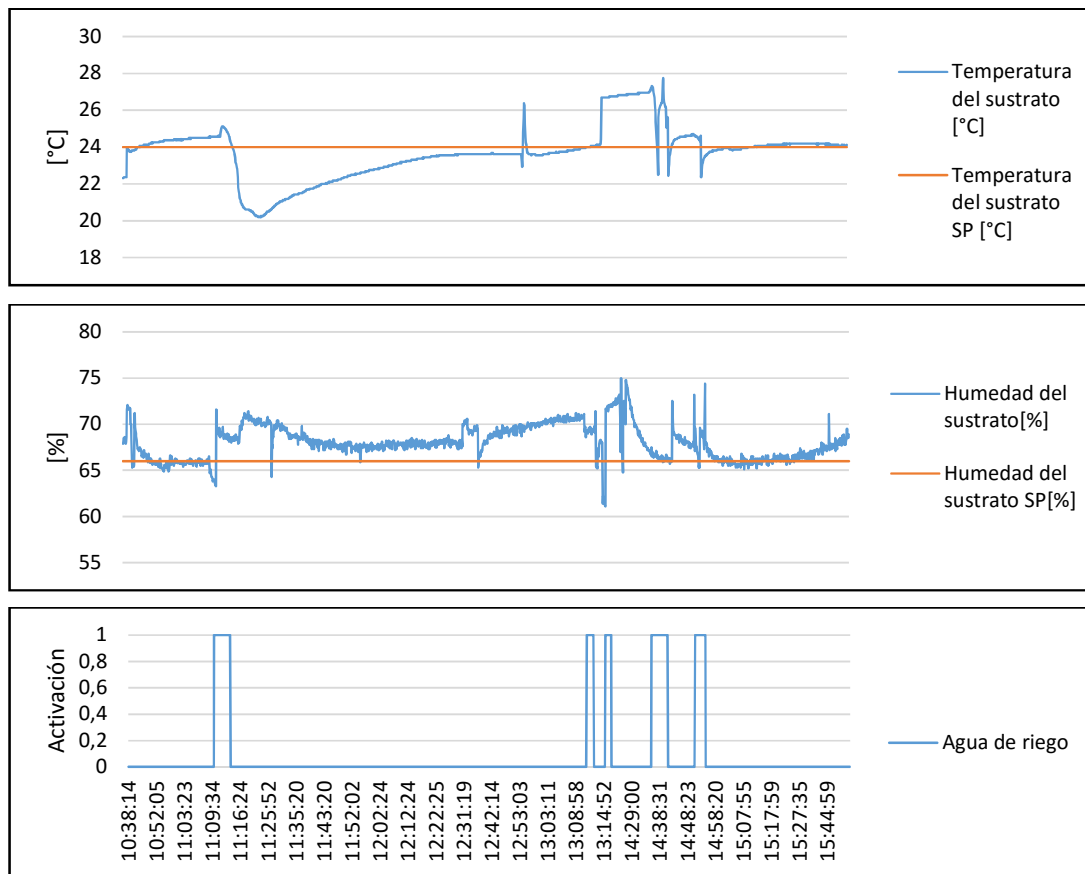
agua y del nutriente; se describe los errores óptimos de cada variable, y los datos obtenidos tabulados de un día de riego, en total 1626 muestras, tomadas generalmente cada 5 segundos.

Tabla 3-4 Errores de las variables de entrada

Variables del sustrato	Unidad de Medida	Rango optimo del error	Error de las variables de medida				
			Media	Moda	Mediana	Máximo	Mínimo
Temperatura	[°C]	-3 a +3	+0.28	+0.38	+0.19	+3.81	-3.75
Humedad	[%]	-7.5 a +7.5	-2.03	-1.80	-1.90	+4.90	-9.00
Ph	[pH]	-0.5 a +0.5	+0.47	+1.00	+1.00	+2.00	-2.00
CE	[uS/cm]	-1000 a +1000	-502.30	-588.00	-549.00	+604.00	-4929.00

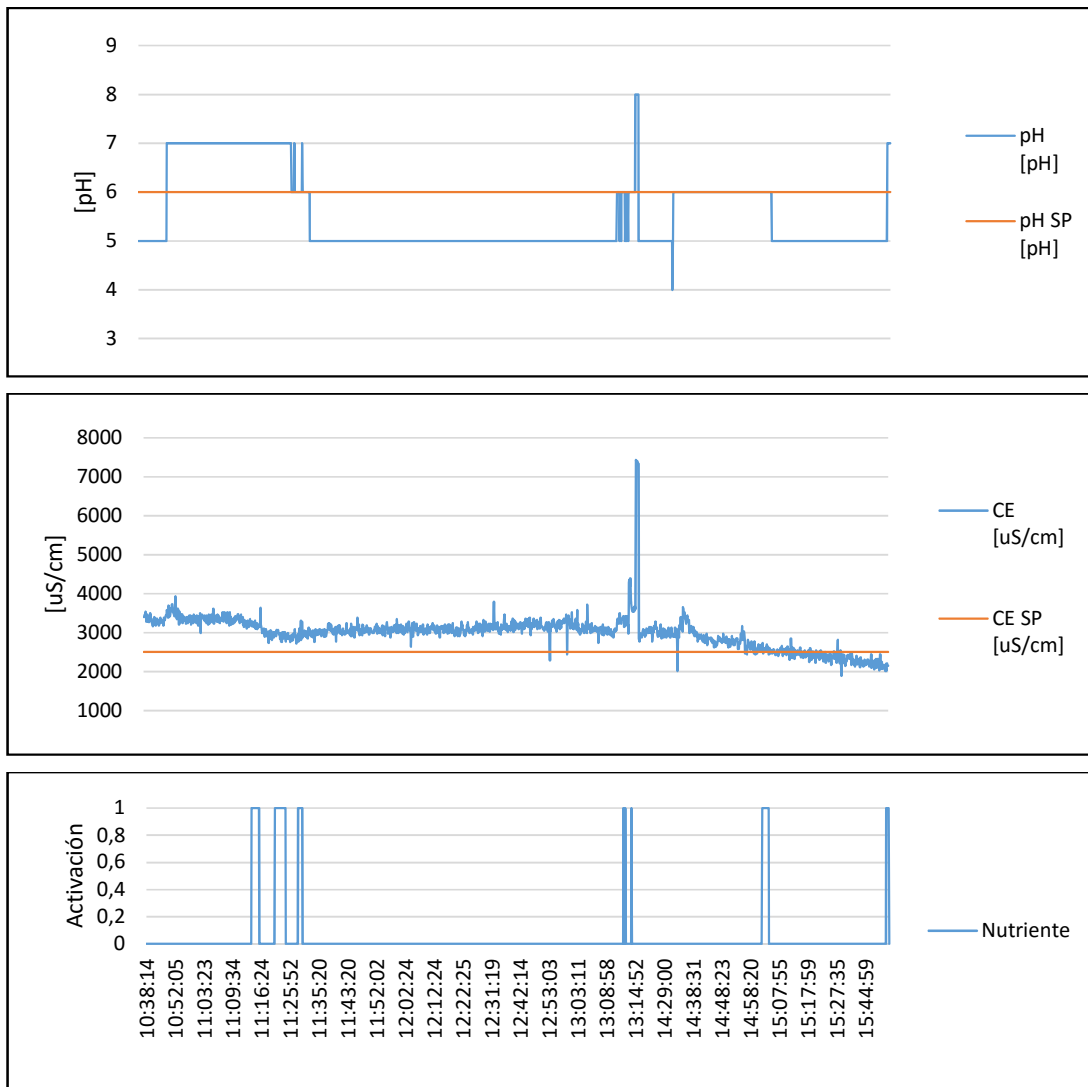
Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Por lo que se puede observar los errores de las variables de entrada están dentro de los rangos óptimos, si observamos su moda que es el valor con mayor frecuencia es en la temperatura de +0.38°C, en la humedad es de -1.8%, pH es +1 unidad, y la conductividad eléctrica de -588 uS/cm.



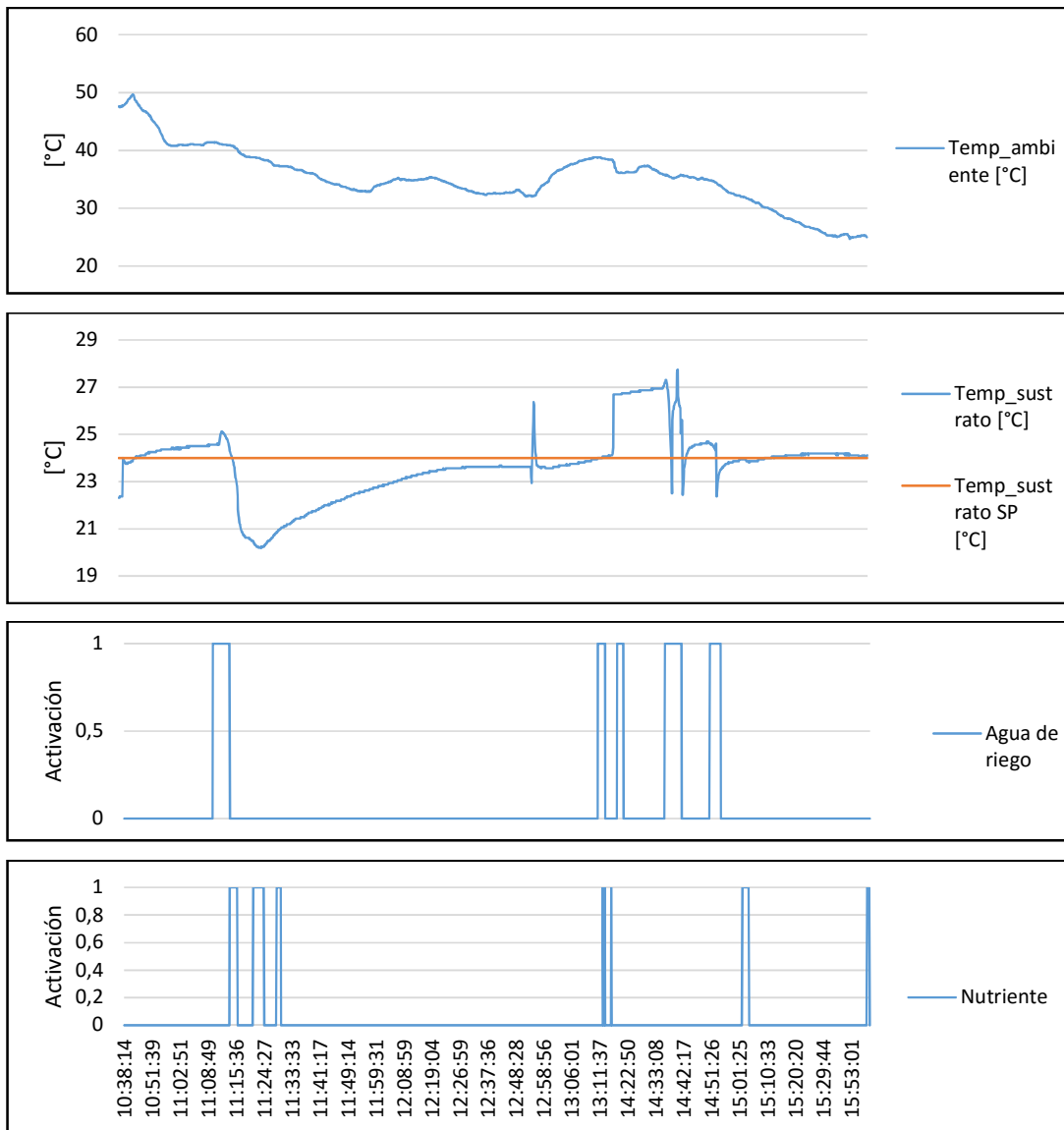
Gráfica 5-4 Gráfica del riego de agua vs temperatura & humedad

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)



Gráfica 6-4 Gráfica del riego de nutriente vs pH & Conductividad Eléctrica
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

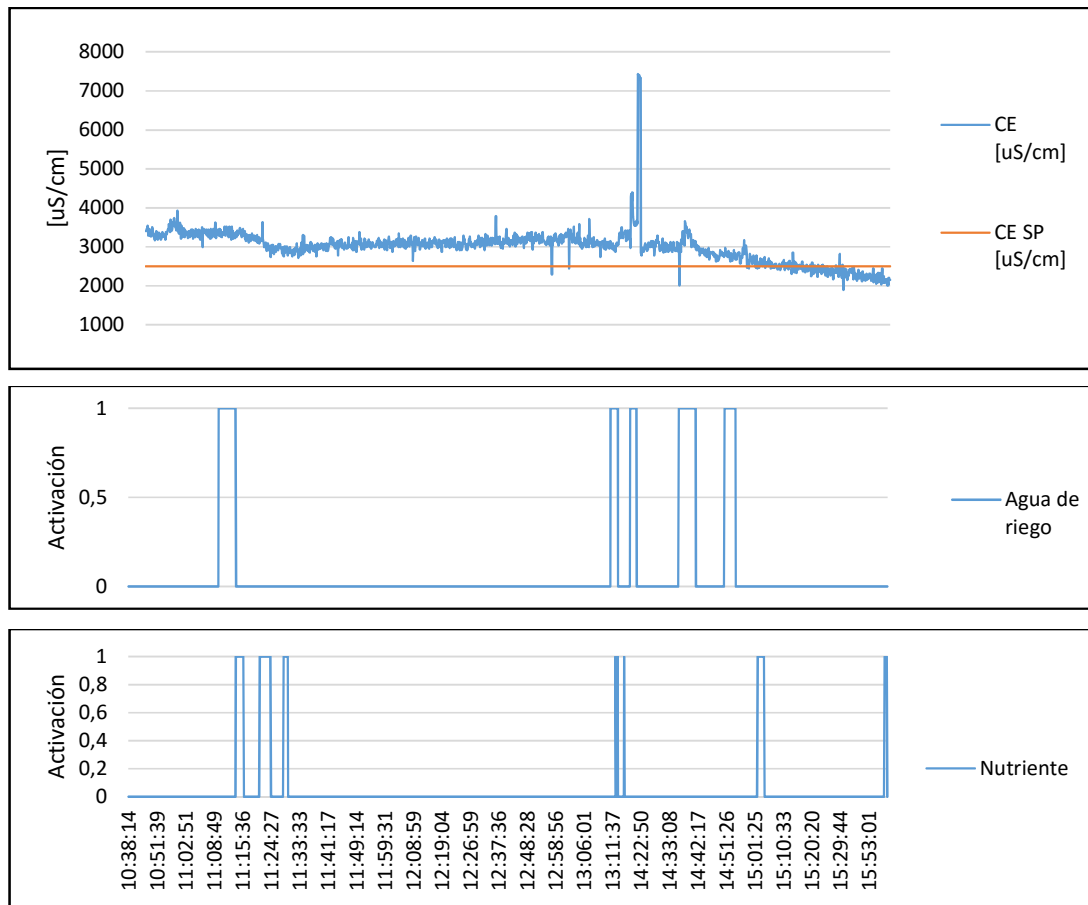
Otro dato de análisis es la temperatura ambiente dentro del invernadero y la temperatura del sustrato; como observamos al mantener una buena humedad, la temperatura ambiente no afectara a la temperatura del sustrato; sin embargo, la temperatura ambiente afectara al cultivo ya que a la mayor temperatura los frutos no podrán engrosar, y maduraran rápidamente; y dar de esta forma frutos pequeños. Mientras la temperatura ambiente descienda afectara a la temperatura del sustrato disminuyéndola.



Gráfica 7-4 Gráfica de la Temperatura ambiente vs Temperatura del sustrato

Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

La conductividad eléctrica es afectada por el riego de agua y de nutriente, se observa que si regamos agua la conductividad eléctrica disminuirá, y si es nutriente subirá; pero en un cultivo de tomate el rango óptimo de conductividad eléctrica es de 1500 a 3500 uS/cm. Los tiempos totales de riego son de 16 minutos con 25 segundos de agua de riego y de 10 minutos con 24 segundos de nutriente.



Gráfica 8-4 Gráfica de Conductividad Eléctrica vs Riego
 Realizado por: (Lema H., Iván M., 2017)

Los tomates riñón cultivados y cosechados mediante agricultura hidropónica son más saludables ya que no requieren el uso de pesticidas ya que no se cultiva en el suelo; y no tiene deformaciones fisiológicas por el control del riego. Se muestra el tomate variedad Daniela comprado en el mercado, se observa deficiencia de calcio y potasio con rajaduras concéntricas producidas por riego manual a determinadas horas del día. El diámetro de los tomates del mercado variedad Daniela son de 2 ½” a 3 ½”, mientras que los cultivados en el invernadero son de 3 ½” a 4” en su primera cosecha.

El consumo del recurso hídrico es de 30 ml/min en cada gotero, quiere decir que por cama se consumió 1.5 l/min, en total por 6 camas 9 l/min. Esto quiere decir que en 15 minutos el consumo de agua es de 135 litros aproximadamente. El consumo de la solución nutritiva es de 5 l/min, quiere decir que en 8 minutos el consumo es de 40 litros aproximadamente, donde el riego varía dependiendo del clima y la etapa fenológica de la planta

4.2 Trabajos Futuros

Para los trabajos futuros en el cultivo de tomate riñón variedad Daniela con un sistema de control para el riego por goteo mediante control difuso basado en agricultura hidropónica, se mejora el control proporcional al aumentar o disminuir el tiempo de riego con la variable de temperatura dentro del invernadero; en nuestro trabajo nuestra constante $K=1$; pero con este dato se aumenta o disminuye el riego. También se debe hacer una etapa en el tanque del nutriente para revolver la solución y mantener el pH en todo el recipiente, por lo que deberíamos colocar una válvula proporcional en el retorno hacia el recipiente conjuntamente con un sensor de pH de líquidos. Igualmente se debe incrementar un interlock de bajo nivel en el tanque como seguridad.

La importancia de los cultivos hidropónicos es fundamental para el desarrollo de mejores entornos para la agricultura para tener una producción constante; libre de vectores; acelerar el crecimiento de las plantas, tener productos de buena calidad, por lo que siempre se debe monitorear siempre todas nuestras variables de interés.

CONCLUSIONES

- Los cultivos hidropónicos se caracterizan principalmente por no ocupar el suelo como medio de transporte del agua y los nutrientes; sino utilizar elementos que provean ciertas características de humedad para colocar una solución nutritiva. Para la producción de tomate riñón u otra hortaliza se deben cultivar en un sustrato dentro de contenedores y en lugar protegido como un invernadero. Los sensores a usar deben ser temperatura, humedad, pH y conductividad eléctrica del sustrato; estos sensores deben tener el alcance necesario para las necesidades del cultivo, uso en exteriores y una precisión de $\pm 0,5$ unidades, que sirven para disponer de la cantidad del agua de riego y el nutriente. Para el riego se debe considerar válvulas on-off o proporcionales; éstos deben ser manuales o automáticas.
- Con el monitoreo de las variables de temperatura, humedad, conductividad eléctrica y pH del sustrato se conoce cuando se realiza el riego de agua o nutriente sea de forma automática o manual; y de esta forma prevenimos las enfermedades fisiológicas por un uso deficiente del recurso hídrico. Con la implementación de la interfaz hombre-máquina mejoramos la producción del cultivo de tomate riñón variedad Daniela y visualizamos de forma práctica las variables del proceso al controlar la cantidad de riego por medio de sus actuadores.
- Mediante el estudio de los sistemas de control con lógica difusa se propuso el algoritmo con un motor de inferencia difusa mandami; basada en las necesidades de los cultivos hidropónicos para la producción de tomate riñón variedad Daniela, que nos dieron todas las reglas de difusificación, y así determinar los tiempos máximos de riego de agua y nutriente (15 minutos y 8 minutos respectivamente).
- Con las evaluaciones experimentales comprobamos que el controlador difuso que se diseñó y se implementó tienen tiempos similares. Con la recolección de datos del algoritmo implementado se obtuvo los siguientes valores de error temperatura $+0.38^{\circ}\text{C}$, de humedad -1.8% , de pH $+1$ unidad, y de conductividad eléctrica de -588 uS/cm; estos valores se encuentran dentro de los rangos óptimos para las necesidades de cultivo de tomate riñón variedad Daniela basado en agricultura hidropónica, donde su desempeño es óptimo ya que se encuentra cerca de tener un error en cero.
- Se obtuvo en la implementación que en un día de riego a una temperatura ambiente de 35°C se tiene un promedio de 16 minutos para agua de riego y de 10 minutos de nutriente; y comprobar que los tiempos máximos de riego en el diseño (15 y 8 minutos respectivamente) están de acuerdo a las necesidades de los cultivos hidropónicos basados en lógica difusa.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar una etapa de recirculación en el tanque de la solución del nutriente, para mantener un pH de acuerdo a las necesidades de del cultivo; debe tener un sensor de pH de líquidos. También se debe colocar un interlock de bajo nivel como seguridad del sistema implementado.
- Se debe implementar una etapa de corrección de la constante proporcional del controlador; donde varié al depender de la temperatura del ambiente dentro del invernadero. Si existe mayor temperatura el riego debe prolongar o si desciende la temperatura se debe disminuir el tiempo de riego.
- Se debe dar mantenimiento al sistema de riego por goteo, ya que por las sales disueltas tanto del agua de riego como del nutriente pueden crear obstrucciones y disminuir la salida de líquido de los goteros; se lo debe realizar por lo menos una vez cada mes.
- Se recomienda medir el pH del agua de riego y del nutriente para tener una medición de la calidad del líquido a usar, ya que si no se puede tener desordenes fisiológicos o el sistema no funcione de una forma óptima.
- Se debe tener cuidado con el uso de sustratos orgánicos, ya que deben ser correctamente desinfectados; a fin de no tener la probabilidad de contagio a la planta con cualquier especie de hongo o bacteria.

BIBLIOGRAFÍA

Agrostart. (2011). *Las desventajas de los invernaderos.* Recuperado de: <http://agrostart.blogspot.com/2011/06/ventajas-que-ofrecen-los-invernaderos.html>.

Barbaro Lorena A., Karlanian Monica A., M. D. A. (n.d.). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas. *Ministerio de Agricultura, Ganadería Y Pesca.* Recuperado de: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia_del_ph_y_la_conductividad_elctrica.pdf

Bedón Álvarez, K. D., & Tovar Herrera, A. Y. (2016). *Implementación de un Sistema de Control Automático con Monitoreo a través de la Web para la producción de Tomate Riñon variedad Daniela basado en la agricultura hidropónica y control de riego de agua por goteo en el invernadero localizado en el barrio San Gerardo de la Ciudad de Latacunga.* (Tesis de pregrado, Escuela Superior Politecnica del Ejército). Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/12404?locale-attribute=de>

Beltrano, J. Gimenez, D. (2015). Cultivo en hidroponía. *Universidad Nacional de La Plata, 1*(978-950-34-1258-9), 180. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1

Berrios, M., Arredondo, C., & Tjalling, H. (2007). *Guía de Manejo de Nutrición Vegetal de Especialidad. Tomate,* 1–103.

Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture, 5*(4), 359–387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>

Bouzo, C. A., & Gariglio, N. F. (2014). *Tipos de invernaderos.* Recuperado de: http://www.agrotransfer.org/index.php?option=com_content&view=article&id=99:tipos-de-invernaderos&catid=45:articulo-tecnico&Itemid=112

Camacho Ferre Francisco. (2017). *EL cultivo del Tomate bajo invernadero,* 27.

Environment, H. (2013.). *Guía: Tipos de sustratos para Hidroponía : .: Hydro Environment .: Hidroponía en México.* 2013. Recuperado de:

http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=32

Environment, H. (2013). *Guía: ¿Qué es un sustrato?*. Recuperado de: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=31

Fernandez Gomez, R., Yruela Morillo, M. del C., Milla Milla, M., & Garcia Bernal, Juan P. Oyonarte Gutierrez, N. A. (2010). *Manual de Riego para agricultores, modulo 4, Riego Localizado*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

García, E., & Flego, F. (2015). *Agricultura de Precisión*, 99–116.

González Morcillo, C. (2011). Lógica Difusa, una introducción práctica. *Técnicas de Softcomputing*, 29. Recuperado de: <http://www.esi.uclm.es/www/cglez/index.php?lang=es&sec=teaching>

HortiCultivos. (2016). *Riego avanzado en invernaderos en suelo y sustrato* - Revista HortiCultivos. Recuperado de: <https://www.horticultivos.com/4374/riego-avanzado-en-invernaderos-en-suelo-y-sustrato/>

Hydro Environment. (n.d.). *Guía_ ¿Qué es un invernadero?*. Recuperado de: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=44

Ecuador. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2015). *Información Ambiental En La Agricultura*, 32. Recuperado de: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-agroambiental/>

Ecuador. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2017). Encuesta nacional de empleo, desempleo y subempleo.

Jaramillo, J., Rodriguez, V., Guzmán, M., Zapata, M., & Rengifo, T. (2007). *Buenas Prácticas Agrícolas en la Producción de tomate bajo condiciones protegidas*. Manual Técnico -BPA-, 331. [https://doi.org/\(Doc. 22213\)](https://doi.org/(Doc. 22213))

Jiménez Escamilla, I. S. (2012). *Control de Temperatura de un Horno Eléctrico mediante lógica difusa*. (Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca).

Montoya, W. (2016). *Economía y desarrollo agropecuario para el 2016*. Recuperado de: <http://www.revistaelagro.com/economia-y-desarrollo-agropecuario-para-el-2016/>

- Novedades Agrícolas.** (n.d.-a). *Invernaderos Asimétricos*. Recuperado de: <http://www.novedades-agricolas.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-asimetricos>
- Novedades Agrícolas.** (n.d.-b). *Invernaderos Capilla, Multicapilla o Invernaderos Multi-tunel*. Recuperado de: <http://www.novedades-agricolas.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-capilla>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** (2015). *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030*. Informe resumido. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s03.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** (2016). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*, 28. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i6132s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** (n.d.). *Capítulo 6: Producción Vegetal*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s08.htm>.
- Perrachón, J.** (2004). Siembra Directa: ¿qué es? *Plan AGROPECUARIO*, 54–57. Recuperado de: http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R110/R110_54.pdf
- Ponce Cruz, P.** (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería* (Primera Ed). Mexico: ALFAOMEGA.
- Sumpsi, J. M.** (2011). Volatilidad de los mercados agrarios y crisis alimentaria. *Revista Española de Estudios Agrosociales Y Pesqueros*, 2011(229), 11–35. Recuperado de: http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_REEAP/r229_11_35.pdf
- Von Zabeltitz, C.** (2011). *Integrated greenhouse systems for mild climates: Climate conditions, design, construction, maintenance, climate control*. *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7>