

Dirección de Posgrado - Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Estudios de Posgrados - Universidad de Costa Rica



Modelo integrado para la toma de decisiones en procesos naturales por medio de Internet de las Cosas

Tesis sometida a consideración de un tribunal evaluador del Programa Interuniversitario del Doctorado en Ingeniería para optar por el grado de Doctora en Ingeniería.

Arys Indira Carrasquilla Batista

Cartago, 21 de marzo del 2019

Declaro que la presente Tesis de Doctorado ha sido realizada enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo realizado y por el contenido de la correspondiente Tesis de Doctorado.

Arys Indira Carrasquilla Batista

Cartago, 21 de marzo del 2019

Cédula: 159100206626

MODELO INTEGRADO PARA LA TOMA DE DECISIONES
EN PROCESOS NATURALES POR MEDIO DE
INTERNET DE LAS COSAS

Tesis sometida a consideración de un tribunal evaluador del Programa Interuniversitario
del Doctorado en Ingeniería para optar por el grado de Doctora en Ingeniería

ARYS INDIRA CARRASQUILLA BATISTA

Dirección de Posgrado
Tecnológico de Costa Rica

Sistema de Estudios de Posgrados
Universidad de Costa Rica

Cartago, Costa Rica.

25 de marzo del 2019

En cumplimiento de la normativa del Programa de Doctorado en Ingeniería en el Tecnológico de Costa Rica se acepta la tesis presentada por la candidata a doctora. El Examen Doctoral fue presentado el día 25 de marzo del 2019.

El Tribunal Evaluador de esta tesis estuvo integrado por los siguientes miembros

Dr. Alfonso Chacón Rodríguez
Director de Tesis

Dr. Juan Luis Crespo Mariño
Asesor de tesis

Dr. Carlos Ramírez Vargas
Asesor de tesis

PhD. Carmen Elena Madriz Quirós
Directora de Posgrados

Dr. Ramón Molina Bravo
Profesor externo

Resumen

Se ha demostrado ya el efecto negativo que el cambio climático ejerce sobre la agricultura y la producción alimentaria, en particular por el exceso o déficit de precipitaciones, los cambios de temperatura y otras variaciones ambientales asociadas. Estos eventos constituyen una amenaza para la seguridad alimentaria en las economías de ingresos bajos y medios, especialmente para aquellas en el trópico. En este documento se detallan los aportes en el marco de la tesis del programa de Doctorado Académico en Ingeniería para el cumplimiento del objetivo de diseñar un modelo de estimación y toma de decisiones en procesos naturales mediante la medición y multiprocesamiento de variables ambientales por medio de Internet de las Cosas (IdC).

Ante este objetivo, y tomando en consideración que tradicionalmente los agricultores solo conocen y ponen en práctica la horticultura a campo abierto, se presenta como un reto la incorporación de métodos de cultivo en ambientes protegidos, mejor conocidos como invernaderos, de manera tal que tanto agricultores como investigadores puedan utilizar herramientas tecnológicas de fácil uso y bajo costo para la toma de decisiones que favorezcan la producción hortícola.

Dado lo anterior, se procede a establecer un procedimiento metodológico por medio de un controlador de lógica difusa que toma en consideración términos lingüísticos de uso cotidiano sobre la disponibilidad del agua en los cultivos, conductividad eléctrica y pH del drenaje (recolectado y medido automáticamente). Con esto en mente, se incorpora IdC en la investigación científica sobre cultivos de hortalizas en invernaderos con sustrato de fibra de coco y se provee de un sistema autónomo de toma de decisiones relacionadas con fertirriego (fertilizantes + agua) que brinda apoyo oportuno a agricultores e investigadores.

El sistema diseñado se compone de circuitería electrónica, sensores, comunicación a través de telefonía celular, actuadores y un controlador autónomo de lógica difusa con conexión a una plataforma de IdC en la nube. La funcionalidad del sistema fue probada en un invernadero, donde los datos adquiridos de cantidad de drenaje, conductividad eléctrica y pH de éstos, son procesados por el controlador de lógica de difusa tomando en consideración criterios basados en sistemas expertos.

Palabras clave: agricultura en ambientes protegidos, controlador de lógica difusa, horticultura en invernaderos, Internet de las Cosas.

Abstract

Climate change has already shown its negative impact on agriculture and food production, particularly because of rainfall deficit or excess, temperature changes and other associated environmental variations. These events constitute a threat to food security in low and middle income economies, especially for those in the tropics. This document presents the major contributions obtained during the dissertation process in order to fulfill the last requirement of the Doctoral Program in Engineering, namely, the design of an estimation and decision-making model in natural processes through the measurement and multiprocessing of environmental variables by means of Internet of Things (IoT).

Considering this objective, and taking into account that farmers traditionally only know and practice open-air horticulture, the incorporation of cultivation methods in protected environments, better known as greenhouses, is presented as a challenge, in such a way that both farmers as researchers can access technological tools of easy use and low cost for an appropriate decision-making with the aim to improve horticultural production.

Given the above, a methodological procedure is established by means of a fuzzy logic controller that takes linguistic terms of daily use about the availability of water in the crops, electrical conductivity and pH of the drainage (collected and measured automatically). With this in mind, IoT is incorporated into scientific research on vegetable crops in greenhouses with coconut fiber substrate and this provides an autonomous decision-making system related to fertigation (fertilizers + water) that provides timely support to farmers and researchers.

The designed system consists of electronic circuitry, sensors, mobile communication, actuators and a standalone fuzzy logic controller connected to an IoT platform. The functionality of the system was tested in a greenhouse, where the acquired data of drainage quantity, electrical conductivity and pH, are processed by the fuzzy logic controller taking into consideration criteria based on expert systems.

Keywords: agriculture in protected environments, fuzzy logic controller, horticulture in greenhouses, Internet of Things.

A mi amada familia.

Agradecimientos

Gracias Dios porque estás conmigo en cada pensamiento, decisión y acción y porque me has rodeado de personas maravillosas en esta peregrinación terrena.

Arys Indira Carrasquilla Batista

Cartago, 9 de mayo de 2019

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
Lista de símbolos y abreviaciones	xi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Cultivos agrícolas en ambientes protegidos	1
1.1.2 Cultivo de microalgas	3
1.2 Definición y justificación del problema	3
1.3 Objetivo general de la tesis doctoral	5
1.4 Metodología y estructura de la tesis doctoral	5
1.5 Aporte científico y de ingeniería	7
2 Medición automática de drenaje en cultivos hidropónicos	9
2.1 Introducción	10
2.2 Inconvenientes en la medición de drenaje	11
2.2.1 Cambio climático	11
2.2.2 Factores que afectan los cultivos	11
2.3 Desarrollo metodológico	14
2.3.1 Medición manual de variables ambientales en el invernadero	16
2.3.2 Recolección y medición de drenaje	17
2.3.3 Mejora de las mediciones de drenaje con un filtro de Kalman	17
2.3.4 Conexión a la nube	24
2.4 Resultados y discusión	25
2.4.1 Mediciones por medio de la plataforma de Internet de las Cosas	25
2.5 Conclusiones	26
3 Sensor de conductividad eléctrica para medios acuosos altamente salinos	27
3.1 Comparación entre una aleación de nicromio y otra desconocida perteneciente a un sensor.	28
3.2 Pruebas metalográficas y en cámara salina para comprobar características de resistencia de los electrodos de nicromio.	30
3.3 Ensayos de corrosión acelerada en cámara salina.	31

3.4	Estudio metalográfico	31
3.5	Curvas potencio-dinámicas de polarización	33
3.6	Pruebas de comprobación en cada electrodo	35
3.6.1	Medición de corriente en cada electrodo	36
3.6.2	Medición de conductividad en cada electrodo	36
3.7	Descripción técnica de sensor de conductividad	44
3.8	Conclusiones	44
4	Modelado de un controlador de lógica difusa para la toma de decisiones relacionadas con fertirriego	45
4.1	Introducción	46
4.1.1	Toma de decisiones relacionadas con el riego	48
4.2	Metodología e implementación	50
4.2.1	Selección de los sistemas de inferencia fuzzy	50
4.2.2	Criterios para la definición de términos lingüísticos	51
4.2.3	Pertenencia, cobertura y reglas difusas	52
4.2.4	Implementación del controlador de lógica difusa	53
4.3	Resultados y discusión	57
4.3.1	Inclusión de la variable de entrada pH en el controlador de lógica difusa	60
4.4	Conclusiones	62
4.5	Recomendaciones	62
5	Aplicaciones de Internet de las Cosas	63
5.1	Introducción	63
5.2	Internet de las Cosas en la horticultura	64
5.2.1	Integración de un controlador de lógica difusa para la toma de decisiones	68
5.2.2	Ejemplo de codificación del controlador difuso de riego mediante la biblioteca eFLL	70
5.2.3	Comprobación del controlador difuso integrado en un sistema embebido	72
5.3	Internet de las Cosas en un cultivo de microalgas	74
5.3.1	Adquisición de datos para la toma de decisiones	76
5.3.2	Propuesta de uso de eFLL en el cultivo de microalgas	78
5.4	Conclusiones	78
5.5	Recomendaciones	79
6	Conclusiones	81
6.1	Recomendaciones	83
6.2	Trabajo futuro	84
	Bibliografía	85

A	Patente de invención	91
A.1	Campo técnico	91
A.2	Antecedentes de la invención	91
A.3	Sumario de la invención	92
A.4	Breve descripción de las figuras	92
A.5	Descripción detallada de la invención	93
A.6	Ejemplos de realización	98
A.6.1	Ejemplo 1: Fabricación del sensor de conductividad	98
A.6.2	Ejemplo 2: Comparación con sensores comerciales	98
A.6.3	Ejemplo 3: Pruebas de campo	99
A.7	Reinvindicaciones	99
A.8	Resumen	100
B	Pruebas al controlador de lógica difusa	101
C	Código del controlador del lógica difusa	103

Índice de figuras

2.1	Curva sigmoide representando un modelo típico de crecimiento de las plantas, nombrado por Verlhust [1].	12
2.2	Esquemático de las pruebas de campo realizadas para la aplicación del filtro de Kalman en las mediciones de drenaje.	23
2.3	Despliegue de la medición de drenaje en el sistema de IoT ThingSpeak, dato de 1.7 litros obtenido el 07 de diciembre del 2017.	23
2.4	Método manual y automático de medición de drenaje en ambientes protegidos.	24
2.5	Predicción y corrección de la medición de drenaje mediante el filtro de Kalman, $z(k)$ es el valor medido y $x(k)$ valor calculado.	25
3.1	Curvas potencio-dinámicas de polarización para la aleación de nicromio y la aleación desconocida (electrodo inicial) [2].	30
3.2	Fotografías de probetas a diferentes horas de exposición en cámara salina. a) probeta a las 24 horas, b) probeta a las 48 horas, c) probeta a las 72 horas, d) probeta a las 120 horas, e) probeta a las 144 horas, f) probeta a las 168 horas. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].	33
3.3	Metalografías para las probetas de nicromio en estado de suministro a) y sometida a la cámara de corrosión durante 144 horas sin ataque b). 100X. Escala $200\mu\text{m}$. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].	34
3.4	Metalografías para las probetas de nicromio en estado se suministro a) y sometida a la cámara de corrosión durante 144 horas b). Atacada químicamente en una disolución de ácido nítrico al 65% y ácido fluorhídrico al 40%; 100X. Escala $200\mu\text{m}$. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].	34
3.5	Curvas potencio-dinámicas de polarización para la aleación de “nicromio” en agua desionizada (Agua 4), en nutriente fresco (Nutriente 1) y en el lixiviado (Lix 1). Nótese que no hay evidencia significativa de cambio en la cinética de corrosión del electrodo según el medio de evaluación [3].	35
3.6	Esquemático de circuito interno y externo a la fuente de medición para determinar la corriente de cada electrodo (llamado acá DUT) [4].	36

3.7	Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de corriente.	38
3.8	Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de corriente.	39
3.9	Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de $84 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.	41
3.10	Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.	42
3.11	Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de $12880 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.	43
4.1	Representación esquemática desarrollada para un proceso de producción hortícola en ambiente protegido. Se muestran los puntos usuales de recolección de drenaje y de fertirriego. Se muestra también el bloque del conjunto de reglas borrosas, el controlador difuso y el resultado numérico definido por un valor escalar [5].	49
4.2	Curvas de retención de agua en un sustrato ideal. A: % de aire (25%).A.F.D.:% de agua fácilmente disponible. A.R.:% agua de reserva. A.D.D.: % de agua difícilmente disponible. M.S.: % ocupado por material sólido (15%). [6]. A partir de esta imagen es posible establecer los rangos, en porcentaje de volumen, en los cuales el agua estará fácilmente (AFD) o difícilmente disponible (ADD) en los cultivos tomando como referencia un sustrato ideal.	52
4.3	Función de pertenencia de la entrada “Drenaje”, se evidencia el establecimiento de formas triangulares para las condiciones de disponibilidad de agua	55
4.4	Función de pertenencia de la entrada “Conductividad”, se evidencia el establecimiento de formas trapezoidales para las condiciones de CE.	56
4.5	Función de pertenencia de la salida “Fertirriego”, se evidencia el establecimiento de formas triangulares para las condiciones de fertirriego.	56
4.6	Figura2	58
4.7	Ejemplo de la función de pertenencia de Fertirriego. Valor de salida determinado considerando las entradas dadas en la figura 4.6, donde una función triangular es establecida para el conjunto difuso de Fertirriego (imagen generada con el software QtFuzzyLite).	59

4.8	Imagen de entradas y salidas por medio del software FuzzyQlite - se evidencia condición de salida en el Fertirriego dadas las mediciones de drenaje y conductividad	59
4.9	Toma de decisiones de riego con el controlador de lógica difusa evaluando tres variables de entrada: drenaje, conductividad y pH. Se evidencia en el cuadro de salida los valores propuestos para el riego [7].	60
5.1	Toma de decisiones de riego con el controlador de lógica difusa evaluando tres variables de entrada: drenaje, conductividad y pH. Se evidencia en el cuadro de salida los valores propuestos para el riego [7].	66
5.2	Ejemplo de mediciones automatizadas de drenaje, CE y pH con indicación de fecha y hora en formato CSV, mediante la plataforma IdC [8]. El orden de los datos es el siguiente: año-mes-día hora:minutos:segundos UTC, número de dato, dato de drenaje, dato de conductividad y dato de pH.	66
5.3	Ejemplo de medición de volumen de drenaje por medio de la plataforma IdC [8].	67
5.4	Ejemplo de medición de CE en el drenaje por medio de la plataforma IdC [8].	67
5.5	Ejemplo de medición de pH en el drenaje por medio de la plataforma IdC [8].	67
5.6	Microcontrolador Arduino con tarjeta de comunicación GSM para comunicación celular a la plataforma de IdC- ThingSpeak. La toma de decisiones por medio del controlador de lógica difusa se realiza mediante el uso de la librería eFLL la cual reside en el controlador [9].	72
5.7	Ejemplo de decisión de riego mediante el uso del eFLL en un sistema autónomo, despliegue de decisión en la plataforma de IdC ThingSpeak [8]. Se evidencia decisión de riego con valor 0.81 como salida del FLC lo cual representa riego abundante. El valor constante de decisión durante el periodo de medición indica que la decisión de riego ha sido constante.	73
5.8	Datos del controlador de lógica difusa en la plataforma IdC [8]. Se evidencian los cambios en las condiciones de drenaje, conductividad y pH, y la decisión de riego. Es importante destacar que 0.5 indica condición de riego normal, abajo de 0.5 es poco riego y superior es riego abundante.	74
5.9	Decisión de riego mediante el uso del eFLL en el sistema autónomo, despliegue de decisión en la plataforma de IdC ThingSpeak [8]. Se evidencia decisión de riego con valor 0.41 como salida del FLC lo cual representa riego normal.	75

5.10	Representación esquemática del sistema embebido desarrollado aplicado a un cultivo de microalgas. Los sensores están inmersos en el PBR, y los datos se pueden visualizar de forma remota en una computadora a través de Internet. El sistema permitió a los investigadores de biotecnología monitorizar varios cultivos en lugares distantes, para evaluar el impacto en el crecimiento de algas de diferentes condiciones climáticas y altitudes. También se probaron diferentes soluciones nutritivas, y el sistema permitió la rápida implementación de varios experimentos estadísticos, que generalmente requieren una gran cantidad de datos, adaptado de [10].	76
5.11	Figura2	77
5.12	Ejemplo de medición automática de pH mediante el uso de la plataforma IdC - ThingSpeak [8], se evidencia un dato de pH con valor de 6,97 medido el lunes 30 de mayo a las 14:00:40.	78
A.1	Figura isométrica del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.	94
A.2	Figura de la vista superior del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.	94
A.3	Figura de la vista lateral del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.	95

Índice de tablas

2.1	Características químicas del sustrato de fibra de coco [11].	13
2.2	Cantidad de macronutrientes y micronutrientes para la preparación de nutrientes del fertirriego en un cultivo de 300 plántulas de chile dulce (<i>Cap-sicum annum L.</i>) [12].	15
2.3	Especificaciones técnicas de los sensores del sistema	16
2.4	Predicción y corrección de la medición de drenaje mediante el filtro de Kalman- prueba en laboratorio.	22
2.5	Parámetros estimados del sensor de flujo, modelado estadísticamente bajo condiciones de laboratorio.	22
3.1	Datos de peso para ensayo en cámara salina, evidencia que no existe cambio significativo en el peso posterior al tiempo de exposición [3].	32
3.2	Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia que no hay un cambio significativo en las mediciones de tensión y corriente para los tiempos de exposición.	37
3.3	Resultados experimentales para sustancia patrón de 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C.	40
3.4	Resultados experimentales para sustancia patrón de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	40
3.5	Resultados experimentales para sustancia patrón de 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	41
4.1	Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua y conductividad eléctrica [12, 13]	54
4.2	Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua, CE y pH [12, 13]	61
5.1	Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua y conductividad eléctrica [12, 13]	69
5.2	Variables relacionadas con el cultivo de microalgas	77
A.1	Datos comparativos entre sensor comercial y sensor de la invención	99
B.1	Pruebas al controlador de lógica difusa en puntos críticos de toma de decisión	102

33 —————

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

ADD	Agua difícilmente disponible
AFD	Agua fácilmente disponible
AMDD	Agua muy difícilmente disponible
AMFD	Agua muy fácilmente disponible
ANN	Artificial Neural Network
API	Application Programming Interface
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWG	Arbitrary waveform generator
C-neutral	Carbono neutral
CE	Conductividad Eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CIEMTEC	Centro de Investigación y Extensión en Materiales
CONARE	Consejo Nacional de Rectores
COTS	Commercial Off-The-Shelf
DA	Disponibilidad del agua
DPV	Déficit de presión de vapor
DUT	Device under test
eFLL	Embedded Fuzzy Logic Library
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
ET	Evapotranspiración
FEES	Fondo Especial de la Educación Superior
FIS	Fuzzy Inference System
FL	Fuzzy Logic
FLM	Fuzzy Logic Model
FLT	Fuzzy Logic Theory
FS	Fuzzy Sets
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICSP	In-circuit serial programming
IdC	Internet de las Cosas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things

ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
LCD	Liquid Cristal Display
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NFT	Nutrient Film Technique
OCP	Open circuit potential
PBR	Photobioreactor
PD	Porcentaje de Drenaje
pH	Potencial de Hidrógeno
PWM	Pulse width modulation
SMU	Source/Measure Unit
UCR	Universidad de Costa Rica
UNA	Universidad Nacional
USB	Universal serial bus

Notación general

\mathbf{A}	Matriz.
	$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$
$\underline{\mathbf{x}}$	Vector.
	$\underline{\mathbf{x}} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$
y	Escalar.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se describe el problemático panorama actual al que se enfrenta la producción de alimentos con respecto a los efectos del cambio climático, y con ello se ofrece la justificación para el desarrollo de un sistema de toma de decisiones relacionadas con la producción hortícola en ambientes protegidos que minimice los efectos negativos de dicho cambio. En la sección de antecedentes se detalla la génesis y propósitos asociados a la medición de variables relacionadas con el cultivo microalgal y cómo evidenciaron las oportunidades de mejora en los cultivos de hortalizas. Además, se detallan los aportes de la tesis doctoral al cumplimiento del objetivo de diseñar un modelo de estimación y toma de decisiones en procesos naturales, mediante la medición y multiprocesamiento de variables ambientales por medio de Internet de las Cosas (IdC).

1.1 Antecedentes

1.1.1 Cultivos agrícolas en ambientes protegidos

El primer proyecto de investigación y extensión relacionado con cultivos en el que la autora de esta tesis tuvo participación como investigadora dió inicio en el año 2007 y culminó en el 2009. Dicho proyecto estuvo a cargo de la Escuela de Agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) de la sede de San Carlos y consistió en la implementación del sistema de cultivo protegido de hortalizas en tres diferentes zonas agroecológicas: Huetar Norte, Pacífico Norte y Valle Central Occidental. El proyecto “Horticultura protegida en tres zonas agroecológicas de Costa Rica”, se desarrolló con el objetivo de determinar la interacción genotipo-ambiente en el cultivo de tomate y en el uso de sustratos para hidroponía. Como producto final se diseñó e implementó un sistema para la medición periódica de variables climáticas dentro de los invernaderos. Dentro del componente de extensión de este proyecto, fue posible capacitar a personas pertenecientes a asociaciones de desarrollo comunitarias relacionadas con el cultivo protegido de chile dulce y tomate. Además, haber logrado un registro automatizado de la información del desarrollo de la

actividad, favoreció la interpretación y utilización para la toma de decisiones, así como conocimiento actualizado acerca del comportamiento de las especies de cultivo dentro de sistemas protegidos en tres diferentes zonas agroecológicas [14].

En la agricultura convencional los nutrientes requeridos por las plantas son aportados por el suelo principalmente, producto de la degradación microbiana de sustancias orgánicas, como por ejemplo restos vegetales y animales. Según Bertoni y Lombardi Neto [15], las tierras agrícolas se vuelven gradualmente menos productivas por cuatro razones principales: degradación de la estructura del suelo, disminución de la materia orgánica, pérdida del suelo y pérdida de nutrientes, por lo cual también se aplican nutrientes por medios orgánicos o químicos.

La hidroponía es un sistema de producción agrícola basado en la ausencia de suelo, es un término que tiene raíces griegas y está formado de las palabras *Hydro* que significa agua y *Ponos* que representa labor o trabajo, por lo que etimológicamente hidroponía es el trabajo en agua, este vocablo es usado para describir sistemas de producción agrícola basados en agua. Por lo tanto, hidroponía abarca todos los métodos y técnicas para cultivar plantas sin suelo en sustratos artificiales o en soluciones nutritivas bien aireadas.

El crecimiento y desarrollo de las plantas en cultivo sin suelo es posible porque los nutrientes son sustituidos por una solución de compuestos inorgánicos que se agrega en el agua de riego. Esta solución nutritiva es balanceada de manera que a la planta se le facilitan 13 de los 16 elementos esenciales para la formación de biomasa y para completar todos los requerimientos metabólicos. Los otros tres elementos la planta los toma del medio directamente a través de los estomas y de la raíz en forma de dióxido de carbono y agua. En las técnicas de hidroponía existen tres variantes, en medio líquido representado principalmente por las técnicas de raíz flotante y película nutritiva recirculante (*nutrient film technique*, NFT, por sus siglas en inglés)[16].

En medio gaseoso se tiene la aeroponía y en medio sólido la técnica de sustrato sólido. El sustrato sólido debe ser inerte y servir de soporte a las raíces, para conservar la humedad y la solución nutritiva. No existe un sustrato ideal. Se puede sembrar en mezclas preestablecidas de piedra volcánica, granza de arroz, fibra de coco, carbón, entre otros. También es posible sembrar utilizando un único sustrato [6]. Además, es importante mencionar que los cultivos hidropónicos también pueden clasificarse en función del tipo de contenedor, el cual puede ser en camas, bancales, en bolsas horizontales, en recipientes individuales para cada planta, en bolsas colgantes de cultivo rellenas de fibra de coco, carbón, granza de arroz, u otro sustrato [16]. En relación a la forma en que se aporta la solución nutritiva las técnicas más utilizadas son riego por goteo, subrrigación, en agua circulante, bandejas, mesas flotantes o aeroponía. En lo que respecta al uso del drenaje existen dos sistemas, abierto o de drenaje libre y cerrado o recirculante. Para efectos de esta tesis doctoral se utilizó la técnica de sustrato sólido de fibra coco en bolsas horizontales con un sistema de fertirriego (nutrientes + agua) por goteo y un sistema de drenaje abierto con recolección automatizada específicamente para la toma de decisiones.

1.1.2 Cultivo de microalgas

En el año 2012, por invitación de la Escuela de Biología se participó en el proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo de estanque semi-cerrado para el cultivo de microalgas en forma semi-masiva” [17], cuyo aporte fue el desarrollo de dispositivos electrónicos para la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos generados en el proceso de cultivo de microalgas. Específicamente, el objetivo del dispositivo era medir aquellas variables físicas en el medio de cultivo que afectan el crecimiento y desarrollo de las microalgas: pH, temperatura, oxígeno disuelto, dióxido de carbono, luminosidad. Otro elemento importante en el producto final era que los sensores utilizados debían ser sumergibles y soportar condiciones adversas por periodos prolongados.

Como continuación a la primera iniciativa y el marco del proyecto “Desarrollo de un sistema integrado de microalgas para la producción de aceites, acoplado a un biodigestor y a un emisor de CO₂” [18], se incorporó la opción de conectividad por red cableada Ethernet y por red inalámbrica al dispositivo de medición de variables en un cultivo microalgal dentro de un fotobiorreactor (ver [10] para mayores detalles). En el artículo “Internet de las cosas y microalgas: ¿qué tienen en común? [19]”, se explica la relación, aplicación y beneficios entre ambas temáticas.

Posteriormente, se continuó colaborando en la última fase del proyecto de cultivo microalgal, bajo el marco del proyecto de investigación “Establecimiento de un proceso de recolección de biomasa, ultrasonificación y secado de la biomasa algal a partir de un cultivo de *Chlorella vulgaris*, fase II”, realizado entre el 2015 y 2017. Ya en este proyecto, de hecho fue posible incorporar los conocimientos que se habían adquirido durante el inicio de los estudios doctorales de la autora, y dejarlos plasmados en las publicaciones: “Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal” [20], “Aplicaciones IdC: en la ruta del compromiso de Costa Rica de obtener la carbono neutralidad” (“IoT applications: On the path of Costa Rica’s commitment to becoming carbon-neutral”) [21] y “Caracterización de pellets de biomasa de la producción de microalgas de *Chlorella vulgaris* utilizando aguas residuales industriales” (“Characterization of biomass pellets from *Chlorella vulgaris* microalgal production using industrial wastewater”) [22].

1.2 Definición y justificación del problema

Tomando como punto de partida los antecedentes antes citados, así como el informe final de la pasantía doctoral [23] en el proyecto inter-universitario “Efecto del cambio climático en la producción de hortalizas en Costa Rica” [24], se logró tener acceso a datos cuantitativos relacionados con los inicios y evolución de los cultivos en ambientes protegidos. A finales de los años 80, la producción de plantas ornamentales y flores comenzó a darse bajo ambientes protegidos, mediante el uso de invernaderos. Según Marín-Thiele [25], para el año 2010, ya existían en Costa Rica 688,23 hectáreas de ambientes protegidos, las

hortalizas de la familia de las solanáceas se consolidaron como el mayor grupo, abarcando 116 hectáreas, esta puede considerarse como el área cubierta por chile y tomate. Alajuela y Cartago son las provincias con mayor cantidad de agricultura y cubren en conjunto el 80% de la superficie utilizada con ese fin. Sin embargo, el sistema de manejo de estos cultivos en dichos ambientes es el mismo que se usa a campo abierto, lo que se considera una subutilización de la estructura.

Además, se debe tomar en consideración que una de las consecuencias del cambio climático es el aumento en la temperatura global, se estima que puede ser de al menos 2 grados centígrados a lo largo del presente siglo, lo cual repercutirá en escasez del recurso hídrico, se prevee que para el año 2050, 67 países se verán severamente afectados por la escasez del agua [26]. Este aumento en la temperatura provoca mayores problemas con algunas plagas, como la mosca blanca y los ácaros. Por lo tanto, las plantas en cultivos hidropónicos en ambientes protegidos requieren un nivel óptimo de humedad en el sustrato, el cual se obtiene por medio del proceso de fertirriego. Si los agricultores realizan el suministro de fertilizantes de la misma manera que lo hacen en cultivos a campo abierto se produce un desperdicio de agua, nutrientes, tiempo, dinero y otros recursos asociados. De allí surge la interrogante ¿será posible brindar a las plantas la cantidad de nutrientes óptimos (de acuerdo a su estado fenológico) tomando en consideración la medición de drenaje, su respectiva conductividad eléctrica (CE) y pH?

Fue debido a las experiencias recogidas durante los antecedentes referidos que se evidenció la problemática existente, tanto para investigadores como para agricultores, de establecer mecanismos para los procesos productivos de manera tal que se brinden condiciones que permitan controlar, o por lo menos adaptar, estos sistemas bajo las condiciones nuevas causada por el cambio climático. Todo esto representa un reto debido a que el comportamiento de las especies vegetales, en la etapas de crecimiento, floración y producción, es diferente y dependiente del tipo de cultivo, condiciones ambientales, sustrato o solución hidropónica y las decisiones oportunas relacionadas con la nutrición suministrada por medio del fertirriego. Además, otra variable de vital importancia es que, el sistema productivo de este estudio utiliza fertirriego como único medio de suministro de nutrientes, de ahí la necesidad de actuar en consecuencia.

Es importante estudiar el efecto del aumento de la temperatura sobre el rendimiento y la calidad de la producción de hortalizas, con el fin de estimar las posibles consecuencias de este fenómeno, a la vez que permite avanzar en la identificación de herramientas y estrategias que permitan mitigar los efectos perjudiciales del mismo, y brinden alternativas de producción de alimentos bajo dicho escenario. Además, en estas condiciones, es previsible una mayor demanda de agua de parte de los cultivos, por lo que el ahorro de agua en la agricultura es una necesidad imperiosa.

Ante esta situación, en la cual la producción de alimentos se puede ver afectada, si se continúa trabajando con los métodos tradicionales utilizados por los agricultores típicos, es que se consideró importante el buscar formas de aplicar metodologías científicas y de ingeniería, no evaluadas anteriormente en otras investigaciones. Hasta donde le ha sido

posible establecer a la autora, es posible proporcionar un aporte a la ciencia y la tecnología en lo relacionado con la toma de decisiones en cultivos en sustratos de fibra de coco en ambientes protegidos, para regiones tropicales.

Uno de los puntos claves que debe considerarse al plantear este problema de investigación, es que habitualmente los agricultores tradicionales únicamente conocen el comportamiento de las especies vegetales en cultivos a campo abierto, lo que implica que se deben modificar las prácticas convencionales de acuerdo a los requerimientos y procedimientos establecidos para los cultivos en ambientes protegidos [1]. Es por ello que esta tesis se enmarca dentro del trabajo de un grupo multidisciplinario de investigación que labora sobre la manera de mejorar la experiencia de los productores locales. Dentro de dicho marco, es que esta tesis se propuso mejorar, gracias a la experiencia ya adquirida en proyectos anteriores, la metodología de recolección de datos y la gestión de decisiones mediante la integración de Internet de las Cosas objetos (IdC) en la investigación científica de este grupo, con el fin de convertir los datos en información, información en conocimiento y esto en sabiduría para gestionar decisiones en el momento adecuado para los productores [27].

Todo lo ya expuesto ofrece una base justificativa amplia sobre la necesidad de encontrar soluciones técnicas de impacto en el ámbito de la producción agrícola en ambientes protegidos, y es precisamente de ahí que surge el problema general de ingeniería que se ha propuesto resolver esta tesis: ¿es posible incorporar las capacidades de Internet de las Cosas en la solución de sistemas productivos que no solo sean eficientes y asequibles para países como Costa Rica, sino que se adapten a los requerimientos de los especialistas responsables de medir y tomar decisiones ante el panorama generado por el cambio climático, especialmente en los países de ingresos medios y bajos?

1.3 Objetivo general de la tesis doctoral

Como respuesta a la interrogante planteada en el punto anterior, es que se ha definido como objetivo principal de esta tesis: *diseñar un modelo de estimación y toma de decisiones en procesos naturales mediante la medición y multiprocesamiento de variables ambientales por medio de Internet de las Cosas (IdC)*. Para alcanzar dicho objetivo, se siguió el procedimiento metodológico comúnmente llamado “proceso de diseño en ingeniería”, que típicamente se subdivide en los siguientes pasos: definición clara del problema, búsqueda de información pertinente y relevante, planteamiento de múltiples soluciones, escoger la mejor posible solución y por último, implementar y probar [28].

1.4 Metodología y estructura de la tesis doctoral

Para alcanzar el objetivo principal, se subdividió el problema principal en tres problemas específicos con los que normalmente se topan los cultivos hidropónicos: el monitoreo preciso y constantes del drenaje, la medición de la conductividad en el drenaje, y la au-

tomatización de toma de decisión del riego. La solución puntual de estos tres problemas, necesitó luego integrarse en un sistema completo con las capacidades requeridas de conectividad para IdC. Cada uno de estos ítemes es ya un problema complejo de ingeniería, por lo que la tesis se subdividió en capítulos que contienen en sí el estudio del arte, diseño de la solución seleccionada y su evaluación. Se consideró necesario, sin embargo, definir primero el marco referencial bajo el cual se engloba esta tesis dentro de las ciencias agronómicas y la ingeniería agrícola. Es por ello que se ofrece un capítulo inicial (capítulo 2, relacionado con la medición de drenaje), que contiene los aspectos generales comunes del cultivo hidropónico, y describe las potencialidades del uso de sistemas embebidos con capacidades de IdC en este tipo de cultivos en ambientes controlados. Por otro lado, cada capítulo ha sido sustentado con publicaciones por medio de artículos científicos con indexación Scopus o SciELO, y consta de sus propias conclusiones y recomendaciones.

En detalle, en el capítulo 2, el primer problema abordado y solucionado fue la medición precisa y automatizada del drenaje, se determinó que aquí radicaba el principal cuello de botella del proceso de toma de decisiones porque: un error en la recolección o la falta de conocimiento sobre la disponibilidad de agua imposibilita decidir apropiadamente la cantidad de fertirriego que debe aplicarse. Esta es una problemática muy común, que se controla típicamente mediante el monitoreo del drenaje del cultivo. Se describe en este capítulo el desarrollo de un sistema completo que automatiza la recolección, optimiza la medición y envía los datos a una plataforma de IdC para su posterior análisis. El sistema diseñado se compone de circuitería electrónica -comercial-off- the-shelf, (COTS, por sus siglas en inglés) dispositivos (sensores, comunicación 3G y actuadores) y un software que se ejecuta en la nube, el rendimiento del sistema ha sido probado en un invernadero controlado, donde los datos adquiridos a partir de variables ambientales (temperatura, humedad y luz), las condiciones de humedad del sustrato y recolección de drenaje (pH, conductividad y la cantidad en mililitros) se envían a través de Internet y son transformados mediante técnicas de fusión de datos y criterios basados en sistemas expertos. En particular, se utiliza la técnica de filtrado adaptativo lineal conocida como filtro de Kalman, para mejorar la precisión de las mediciones [29, 30].

Una vez que fue automatizado el proceso de medición de drenaje se procedió a identificar el segundo problema a resolver, el cual consistió en cómo medir la conductividad y el pH del drenaje de manera confiable y perdurable. En ese aspecto se determinó que los dispositivos comerciales, específicamente para la medición de conductividad, no poseían la suficiente robustez que les permitiera permanecer sumergido en la solución de nutrientes utilizada para el fertirriego, ni en el drenaje recolectado. Mediante el apoyo del Centro de Investigaciones en Ciencias de los Materiales (CIEMTEC) de la Escuela de Ciencias de los Materiales del ITCR, fue posible realizar pruebas a un material que al final resultó ser resistente al medio acuoso altamente salino que caracteriza tanto a la solución de nutrientes como al drenaje. En el capítulo 3 se ofrecen los detalles del diseño y prueba de funcionalidad del sensor de conductividad eléctrica específicamente diseñado para ser utilizado en medios acuosos altamente salinos, el cual dió lugar a una patente de invención (detalles en apéndice A). La novedad al plantear la solicitud de la patente radica en el

hecho de que el material (Nicromio) fue sometido a pruebas de laboratorio para validar su eficiencia y precisión al permanecer expuesto e inmerso en medios altamente salinos.

El tercer problema a resolver fue el de cómo integrar los datos obtenidos por el sistema y sensores desarrollados en los capítulos anteriores, en un sistema capaz no solo de obtener o desplegar información, sino también con la inteligencia necesaria para la toma de decisiones. El capítulo 4 ofrece el procedimiento seguido para el desarrollo de una estrategia de fusión de datos adecuada, que desembocó en el diseño de un sistema de control de lógica difusa para tomar decisiones de fertirriego a partir de la definición de variables lingüísticas tanto de las entradas como la salida, se toman en consideración las reglas lingüísticas asociadas a la disponibilidad de agua determinada por las mediciones de drenaje y la conductividad eléctrica. El controlador Mandani resultó ser apropiado para valorar formas triangulares y trapezoidales. Como prueba inicial se utilizó un software de lógica difusa, lo que permitió constatar la factibilidad del método propuesto.

El capítulo 5 describe el proceso final de integración y automatización de todo el sistema, con la inclusión de los productos de los demás capítulos en un único sistema embebido con capacidades IdC. Aquí se muestra la integración de la variable pH al controlador de lógica difusa y se utiliza una biblioteca para diseñar un sistema autónomo de toma de decisiones aplicable a la horticultura, con la particularidad que también tiene capacidad de IdC. El controlador fue integrado en un microprocesador y la decisión de fertirriego fue enviada a la plataforma de IdC, situación que permitió brindar una solución integral a todos los problemas enunciados inicialmente. Además, se detalla la aplicación de IdC al cultivo de microalgas, específicamente *Chlorella vulgaris*, así como otros potenciales usos. Por último, en el Capítulo 6 se resumen las principales conclusiones y recomendaciones de cada uno de los capítulos de la tesis doctoral.

1.5 Aporte científico y de ingeniería

Hasta donde ha sido posible averiguar en la investigación previa bibliográfica, no se conoce aún en la literatura una propuesta similar a la de esta tesis en la que se incorpore lógica difusa por medio de términos lingüísticos e IdC en la toma de decisiones relacionadas con fertirriego en cultivos en sustratos de fibra de coco en ambientes protegidos (vale la pena hacer notar que esta suposición parece confirmarse con el alto grado de citas que han recibido algunos de los artículos realizados por la autora, en apenas uno o dos años de haber sido publicados).

El aporte al conocimiento científico y de ingeniería quedó plasmado en la producción de artículos y en una patente de invención, que se detallan a continuación:

- Artículos con indexación Scopus
 - “Integrated processing and control of multiple environmental variables through internet of things (IoT) using COTS components” [10].

- “Using IoT resources to enhance the accuracy of overdrain measurements in greenhouse horticulture” [31].
 - “Proposal of a fuzzy logic controller for the improvement of irrigation scheduling decision-making in greenhouse horticulture” [5].
 - “IoT applications: On the path of Costa Rica’s commitment to becoming carbon-neutral” [21]
 - “Characterization of biomass pellets from *Chlorella vulgaris* microalgal production using industrial wastewater” [22]
 - “A fuzzy logic controller with internet of things (IoT) capabilities and COTS components for monitoring and mitigation of climate change effects on sensible tropical crops” [9].
- Artículo con indexación SciELO y latindex
 - “Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal [20].”
 - Patente de invención
 - “Sensor de conductividad resistente a medios acuosos altamente salinos [32].”

Capítulo 2

Medición automática de drenaje en cultivos hidropónicos

En los cultivos de hortalizas en medios hidropónicos los investigadores y agricultores realizan mediciones de drenaje diariamente con la finalidad de establecer una relación numérica aproximada que permita determinar la cantidad de nutrientes que ha absorbido la planta, esto con respecto al suministro brindado por medio del fertirriego. El dato obtenido es un referente para tomar decisiones relacionadas con la programación de la dosificación de nutrientes y agua del sistema de riego (ver al respecto el capítulo 4), donde se ha incluido el desarrollo de un controlador de lógica difusa que toma en consideración la disponibilidad de agua determinada por la medición del drenaje y la conductividad eléctrica.

En el caso particular de las mediciones de drenaje, (según Valverde Conejo [33] el término drenaje se refiere a la eliminación o evacuación y ordenamiento del exceso de agua de las tierras agrícolas). La forma tradicional de recolección de datos de drenaje es mediante procedimientos manuales en elementos de almacenamiento como envases plásticos para posteriormente medir con probetas o erlenmeyer. Este método tiene la problemática de depender de una persona que tome los datos y registre manualmente en una bitácora, con el consiguiente inconveniente de que la periodicidad a veces es limitada por los recursos económicos y también pueden darse errores u omisiones en el registro.

En esta sección se establece un sistema de recolección y medición de drenaje automatizado, con indicación de fecha y hora. Este dispositivo utiliza electroválvulas, un medidor de flujo y contenedores de recolección calibradas, que permiten visualizar en el sitio los datos asociados a las mediciones de drenaje y el riego en mililitros. La adquisición automática de datos y la aplicación de un filtro Kalman permitió mejorar la precisión de un medidor de flujo de líquido que según datos de fábrica, poseía un porcentaje de error en la medición de 10%. Los resultados obtenidos evidencian el potencial y aplicabilidad del desarrollo de herramientas eficientes para optimizar la toma de datos, lo que posteriormente permitirá tomar decisiones relacionadas con la producción de hortalizas en ambientes protegidos.

Además, en este capítulo se detalla el diseño y pruebas realizadas para la medición de drenaje en cultivos hidropónicos, así como los procedimientos de calibración y ajustes llevados a cabo con el fin de optimizar la precisión en la medición de drenaje. Parte de los resultados obtenidos fueron documentados y presentados en la edición XXXVI de la Convención de Centro América y Panamá de la IEEE (CONCAPAN), según consta en el artículo publicado en el IEEE Xplore en noviembre del 2016 [31].

2.1 Introducción

El cambio climático ya ha demostrado su impacto negativo en la agricultura y la producción de alimentos, en particular debido al déficit o exceso de lluvias, cambios de temperatura y otras variaciones ambientales asociadas que no son conducentes a una agricultura sostenible y que pueden ser graves en los ecosistemas tropicales frágiles. Estos eventos pueden constituir graves amenazas a la seguridad alimentaria en economías de ingreso bajo y mediano ubicadas en estas regiones, como Costa Rica.

Mediante la producción hortícola en ambientes protegidos se busca reducir los efectos negativos del cambio climático en la producción de hortalizas, lo que resulta un desafío para los agricultores, ya que el comportamiento de la mayoría de las especies vegetales cultivadas en ambientes protegidos es notablemente diferente del cultivo en campo abierto, y las prácticas habituales de cultivos deben ser modificadas en consecuencia. Es por eso que se desarrolló un dispositivo que permite realizar mediciones automatizadas del drenaje de manera tal que se pueda tener acceso inmediato a la información para la posterior toma de decisiones.

Según investigadores y agricultores, una de las variables más difíciles de monitorizar para la toma de decisiones es la cantidad de drenaje. Dado lo anterior, se diseña, desarrolla, prueba y se pone en marcha un sistema para mejorar la recolección de datos y la gestión de decisiones, con esto se logró plantear una primera aproximación que da respuesta a la problemática relacionada con la medición automática de drenaje en cultivos hidropónicos. Además, fue posible integrar Internet de Cosas (IdC) en la investigación científica para convertir los datos en información, la información en conocimiento y esto en sabiduría para gestionar la toma de decisiones en el momento adecuado para los productores [27].

El sistema aquí descrito se compone de hardware con componentes comerciales (COTS, Commercial Off-The-Shelf por sus siglas en inglés), (sensores, interfaces de comunicación 3G y actuadores) y software que se ejecuta en la nube (para la adquisición, procesamiento de datos, monitorización y la toma de decisiones). El rendimiento del sistema ha sido probado en dos cultivos distintos, inicialmente con un cultivo de microalgas [10], donde se obtuvieron datos de variables ambientales (temperatura, humedad y luz). Posteriormente, se adapta el sistema a horticultura protegida, en el que se realizaron mediciones de humedad del sustrato y recolección de drenaje (pH, CE y cantidad en mililitros). Los datos recolectados se envían a través de Internet para ser procesados utilizando técnicas

de fusión de datos y toma de decisiones basados en criterio experto.

Es importante destacar que un filtro de Kalman es implementado para proporcionar una solución recursiva a un problema de medición de flujo con el fin de mejorar la precisión de los sensores de flujo utilizados para medir drenaje, en Haykin y Salazar-Moreno (2004) se detalla la teoría asociada a la solución propuesta [29, 30].

2.2 Inconvenientes en la medición de drenaje

2.2.1 Cambio climático

En el marco del proyecto “Efecto del cambio climático en la producción de hortalizas en Costa Rica”, el cual fue propuesto y desarrollado como una iniciativa entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), la Universidad Nacional (UNA) y la Universidad de Costa Rica (UCR) mediante una solicitud de financiamiento con recursos del fondo del sistema 2014 (FEES-CONARE), se planteó como objetivo principal, evaluar el efecto del cambio climático en la producción de hortalizas utilizando ambientes controlados como una forma para definir estrategias que permitan enfrentar el impacto de este fenómeno [24]. Para apoyar a los investigadores en el cumplimiento de dicho objetivo, se desarrolló un dispositivo electrónico asequible para medir las variables ambientales (temperatura ambiente, humedad e intensidad de luz), así como la humedad del sustrato. Además, se diseñó e implementó un sistema que permite adquirir y medir la cantidad de drenaje, el pH y la conductividad. Esta información se utilizó para tomar decisiones sobre cómo minimizar la frecuencia del proceso de riego, la cantidad requerida de agua, nutrientes y fertilizantes durante todo el período de crecimiento y producción de algunos de los cultivos estudiados.

2.2.2 Factores que afectan los cultivos

Para comprender qué variables críticas son típicamente controladas en los cultivos en ambientes protegidos, se debe saber que los principales factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas son (de acuerdo con [1]): luz, temperatura, humedad del sustrato, humedad relativa y nutrición. Otros factores (que ocurren artificialmente) que también están implicados en el crecimiento son el uso de pesticidas, el pH del suelo, el uso de hormonas y compuestos esteroides. El crecimiento de las plantas puede ser modelado por la función de crecimiento logístico llamada por Verhulst y modelada por la ecuación 2.1:

$$y = \left(\frac{c}{1 + ae^{-rx}} \right) \quad (2.1)$$

donde c corresponde al valor máximo de la curva y r a la pendiente. En la Figura 2.1

se muestra una representación gráfica de la función logística conocida como el modelo de Verhulst.

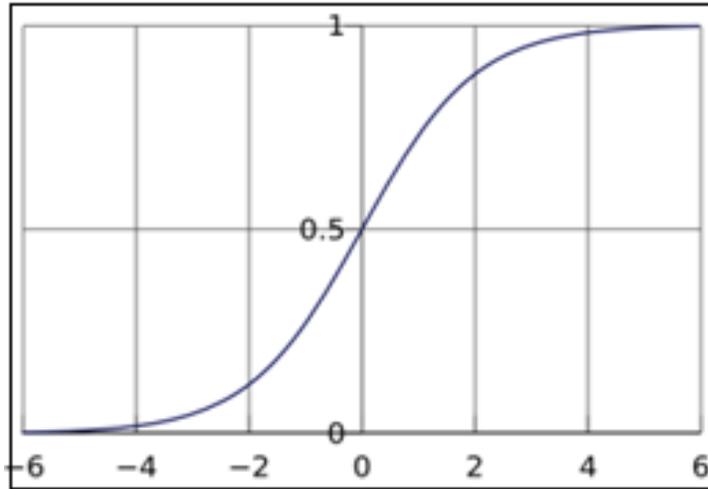


Figura 2.1: Curva sigmoide representando un modelo típico de crecimiento de las plantas, nombrado por Verhulst [1].

En el lado positivo de la Figura 2.1, el primer tercio se conoce como el crecimiento exponencial de la planta. El segundo tercio se llama etapa de saturación, mientras que el último tercio es donde el proceso de crecimiento se detiene. Este modelo se utiliza intensivamente en biología, especialmente en ecología. Para el caso particular de esta tesis doctoral se evalúa la nutrición de las plantas por medio de la medición de cantidad de drenaje, en mililitros, así como la conductividad eléctrica (CE) en mS/cm (mili Siemens por centímetro). Cabe destacar que es posible establecer una relación del aprovechamiento de los nutrientes suministrados por medio del fertirriego y así determinar la frecuencia óptima de riegos en los cultivos.

Los cultivos pueden ser realizados en diferentes tipos de sustratos. Según Valenzuela et. al (2014) [34], el término sustrato se aplica a todo material sólido distinto del suelo, cuyo origen puede ser natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical, desempeñando un papel de soporte para la planta. Cuando se utilizan sustratos es imprescindible conocer las propiedades físicas y químicas del medio, dado que a diferencia del suelo la planta solo obtendrá los nutrientes, requeridos para su crecimiento y desarrollo, por medio del sistema de fertirriego.

Por otro lado, los sustratos son el medio de suministro del agua y los minerales requeridos para el tratamiento vegetal. El sustrato óptimo está definido por la especie vegetal o cultivar, el tamaño del envase, bandeja, saco o maceta y las condiciones ambientales del área de producción. En el caso particular de este estudio, la siembra se realizó en sacos plásticos de 1m de largo que contienen sustrato de fibra de coco y los mismos fueron ubicados en un invernadero.

En la Tabla 2.1 se muestran las características químicas del sustrato de fibra de coco,

Tabla 2.1: Características químicas del sustrato de fibra de coco [11].

Parámetro	Valor	Unidad
pH	5	
Conductividad Eléctrica (CE)	2,15	mS/cm
Nitrógeno total <i>N</i>	0,51	%
Fósforo total <i>P₂O₅</i>	0,20	%
Potasio total <i>K₂O</i>	0,60	%
Calcio total <i>CaO</i>	1,40	%
Magnesio total <i>MgO</i>	0,20	%
Sodio total <i>NaO</i>	0,187	%
Hierro total <i>Fe</i>	0,206	%

en donde se debe resaltar la importancia de la conductividad eléctrica (CE) como una medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales en el sustrato o drenaje, esto se justifica con el hecho de que la CE es directamente proporcional a la concentración de sales. Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas relacionados con el grado de efecto tóxico producido por un compuesto químico sobre el crecimiento de las plantas, definido como fitotoxicidad en el cultivo. Por este motivo al formular un sustrato, se debe analizar la CE de los componentes para evaluar el porcentaje a utilizar en la mezcla sin elevar la CE final del sustrato formulado [35].

La existencia o no de elementos minerales y no minerales en el cultivo pueden afectar el crecimiento de las plantas, sobre todo tomando en consideración que al realizar la siembra en sustrato la única manera que tiene el cultivo de obtener los minerales esenciales es a través de la fertirrigación.

A continuación el detalle de los minerales y no minerales relacionadas con el crecimiento y desarrollo de las plantas:

No-minerales: la falta o escasez de uno solo de estos elementos puede causar que la planta se comporte de manera errática y morir por la ausencia de nutrientes.

- Hidrógeno, obtenido del agua y también utilizado en la fotosíntesis durante las reacciones dependientes de la luz.

- Dióxido de carbono, utilizado como reactivo para la fotosíntesis.
- Oxígeno, utilizado por las plantas para la respiración celular como una forma de descomponer las moléculas de azúcar, en este caso la glucosa.

Minerales: se establece una línea divisoria entre los nutrientes requeridos en mayores cantidades, los macronutrientes, y los elementos requeridos en cantidades más pequeñas, micronutrientes. Esta división no significa que un elemento nutritivo sea más importante que otro, sólo que se requieren en cantidades y concentraciones diferentes [36].

- Macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- Micronutrientes: elementos esenciales para el crecimiento de las plantas que se necesitan en cantidades muy pequeñas: boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

En la tabla 2.2 se detalla la cantidad en kilogramos de macronutrientes y micronutrientes según el tipo de cultivar, en este caso particular chile dulce (*Capsicum annum L.*). Además, se especifican las proporciones o receta de fertirriego para 300 plántulas tomando en consideración la semana después del trasplante del cultivar Nathalie. Los datos de la tabla fueron suministrados por el Ing. Milton Solórzano Quintana, docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR.

Es importante destacar que las características físicas del sustrato cambian según la finalidad del uso: semilleros, crecimiento y desarrollo, enraizamiento de estacas. Específicamente para la aplicación de interés que es “Crecimiento y desarrollo” se requiere que el sustrato tenga textura media a gruesa, con mayor capacidad de aireación, nivel óptimo de fertilizantes y buen drenaje [34].

2.3 Desarrollo metodológico

El enfoque metodológico seguido fue el de desarrollar un dispositivo electrónico con acceso a Internet, capaz de medir y almacenar automáticamente las variables de interés de un cultivo previamente seleccionado: pepino y chile. Los investigadores solicitaron que se almacenaran algunas variables ambientales y locales: temperatura ambiente e intensidad de luz, humedad del sustrato, cantidad de drenaje, pH y conductividad.

En primera instancia, tal como se evidencia en las subsecciones siguientes, se determinaron las especificaciones técnicas de los sensores a utilizar, esto con fin de comprobar que la precisión y el rango de funcionamiento se encontraban entre los parámetros mínimos de los instrumentos usados en las mediciones manuales. Posteriormente, se realizan mediciones manuales y automáticas durante un periodo de cuatro meses. Después, se implementa un filtro de Kalman para mejorar la precisión del sensor de flujo y logra bajarse de 10% a

1%. Por último, se establece una conexión a la nube para que los investigadores puedan tener acceso 24/7.

Un aspecto clave del sistema es su precio final, ya que aunque inicialmente el sistema está destinado a los investigadores para su validación en campo y verificación de funcionalidades, a mediano plazo se espera que los productores puedan tener acceso a la tecnología desarrollada. Por lo general, los productores tienen medios económicos limitados, lo que restringe el uso de caros registradores de datos que varían típicamente del orden de varios miles de dólares, sin incluir las tarifas de licencias de software. Estos requerimientos no sólo dictaban la elección de un sistema basado en componentes COTS, sino que también promovían el uso de herramientas de procesamiento en línea, disponibles a bajo costo en la nube.

La Tabla 2.3 muestra los sensores utilizados para medir las variables solicitadas. De particular interés fue el uso del medidor de flujo de líquido, ya que las mediciones precisas de drenaje son críticas para este tipo de cultivo con el fin de asegurar un riego adecuado. Esta medición suele ser realizada por un asistente una vez al día, muy temprano en la mañana. Pero en los países tropicales, incluso en entornos protegidos, las condiciones ambientales sufren rápidas variaciones que, aunque no extremas, afectan gravemente a

Tabla 2.2: Cantidad de macronutrientes y micronutrientes para la preparación de nutrientes del fertirriego en un cultivo de 300 plántulas de chile dulce (*Capsicum annum* L.) [12].

Macronutrientes (Kg/semana)	Semana 0 a 2	Semana 3 a 8	Semana 9 a 15	Semana 16 a 22	Semana 23 a 28
Nitrato de calcio - $Ca(NO_3)_2$	0,24	0,8	0,875	1,4	1,3
Nitrato de potasio - KNO_3	0	0,12	0,2	0,8	0,5
Fosfato monoamónico (12-61-0) - $NH_4H_2PO_4$	0,32	0,28	1,32	1,2	1,2
Fosfato monopotásico (0-52-34)- KH_2PO_4	0,72	0,8	0,925	1,2	1,0
Sulfato de potasio - K_2SO_4	0	0,42	0,9	0,85	2,1
Sulfato de magnesio - $MgSO_4$	0,625	0,8	1,25	1,85	1,65
Ácido fosfórico - H_3PO_4	0	0	0	0	0
Nitrato de magnesio - $Mg(NO_3)_2$	0	0	0	0	0
Micronutrientes (Kg/semana)	Semana 0 a 2	Semana 3 a 8	Semana 9 a 15	Semana 16 a 22	Semana 23 a 28
Ácido bórico - H_3BO_3	0,025	0,03	0	0	0
Sulfato de zinc monohidratado - $ZnSO_4$	0,025	0,05	0	0	0
Sulfato de manganeso monohidratado - $MnSO_4$	0	0,06	0	0	0
Nutrex micros	0	0	0,25	0,25	0,25

ciertos cultivos. En este caso, el medidor de flujo de líquido estaba destinado a proporcionar un seguimiento más estrecho de los datos de drenaje. Sin embargo, como se desprende de la Tabla 2.3, su precisión es baja ($\pm 10\%$), lo que motivó el uso de un filtro para mejorar su valor final. Para calcular la frecuencia en Hertz (Hz), se supusieron las siguientes condiciones: (L/min) es de 7,5, y el medidor de flujo de líquido genera 450 pulsos por litro.

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas de los sensores del sistema

<i>Sensor</i>	<i>Precisión</i>	<i>Rango</i>
Temperatura (LM35) [37]	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 25°C	$-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Humedad Relativa (HIH-4000) [38]	$\pm 0,5\%$ RH	0% - 100% RH
Luz (LS-BTA Vernier) [39]	± 50 lux	0 - 150000 lux
Humedad del sustrato (SEN-13322) [40]	$\pm 0,5\%$	0% - 100%
pH (PH-BTA Vernier) [41]	$\pm 0,2$ pH	0 - 14 pH
Conductividad (Pure Atomist, Nicromo cable 80, 32 AWG) [42]	$\pm 2\%$	0,07 - 500000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Medidor de flujo (Adafruit ID:828) [43]	$\pm 10\%$	1 - 30 litros/min

2.3.1 Medición manual de variables ambientales en el invernadero

Durante el primer semestre del 2016 se llevó a cabo el desarrollo de la pasantía doctoral. Diariamente en ese periodo, las muestras de temperatura y humedad relativa se tomaron mediante el uso de un termómetro y un higrómetro manual con pantalla de cristal líquido (LCD, Liquid Cristal Display, por sus siglas en inglés). Estos datos se utilizaron como referencia para posteriormente compararlos contra los que fueron adquiridos automáticamente en la plantación de pepinos, comenzando el 8 de febrero y terminando el 17 de mayo. 100 muestras para cada variable fueron registradas manualmente.

El registro manual de variables ambientales de temperatura y humedad tienen como objetivo brindar información sobre el estado al que se encuentran sometidas las hortalizas dentro del ambiente protegido. Los inconvenientes que presenta la recolección manual es que requiere de una persona (asistente de investigación) que se desplace al invernadero a distintas horas del día, tome nota de los valores de interés y posteriormente digitalice en una base de datos con indicación de fecha y hora las variables de temperatura y humedad.

El tiempo que toma el asistente en desplazarse hasta el invernadero, aunado al tiempo en registrar los datos y la probabilidad de error en la transcripción, imposibilita la toma de decisiones oportunas en relación a cambios en el riego o fertirriego.

La relación entre la toma de datos manuales y los registrados automáticamente fue de 100 a 10000, con la ventaja de que el investigador puede ingresar al sistema en cualquier momento a través de Internet.

2.3.2 Recolección y medición de drenaje

Respecto a la recolección de drenaje, mediciones de pH y conductividad, normalmente se recogen también a mano por un asistente. Como ya se ha explicado, estos datos proporcionan la información necesaria para que los investigadores (y los productores) determinen la periodicidad del riego. El sistema implementado automatizó la recolección de datos de estas variables y lo subió a la nube para permitir el acceso continuo a los investigadores, pero también mostró que la medición de drenaje requería ser optimizada en términos de precisión y esto motivó la mejora de las mediciones mediante una técnica de fusión de datos, capaz de funcionar en el microprocesador del sistema.

2.3.3 Mejora de las mediciones de drenaje con un filtro de Kalman

Como ya se ha explicado, se añadió un medidor de flujo de líquido al sistema, con el fin de facilitar la medición del sobre-drenaje y acelerar las decisiones de riego. Sin embargo, el error $\pm 10\%$ en el sensor utilizado estaba muy por detrás de la precisión requerida para un desempeño óptimo. Con el fin de mejorar la recolección de datos de drenaje automático, se implementó un filtro Kalman que se ejecuta en el dispositivo de adquisición. Aunque el algoritmo de Kalman puede ser costoso en hardware, varias consideraciones pueden reducir sus requerimientos de procesamiento si se estudian cuidadosamente, como se muestra en [44, 45, 46].

Un filtro de Kalman encuentra el factor de promedio óptimo para cada estado consecuente mientras se utiliza la memoria de estados pasados para ajustar su estimación. Hay tres pasos para resolver el filtro de Kalman:

1. Tener un modelo tanto del sistema dinámico como del sensor (especialmente en cuanto al ruido asociado) es obligatorio. En nuestro caso, se creó un modelo simple utilizando las ecuaciones 2.3 y 2.4, con un modelo de ruido gaussiano aplicado al sensor (esto significó una cuidadosa modelización estadística del sensor de flujo bajo un entorno controlado).
2. Iniciar el proceso, predecir y corregir; las ecuaciones 2.5 y 2.6 se usan para determinar los parámetros requeridos y los valores iniciales.

3. Iterar a través de las estimaciones; las estimaciones previas serán la entrada para el estado actual.

Las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 son requeridas para calcular la estimación actual del filtro, donde X_k : es la estimación actual, K_k : ganancia de Kalman, Z_k : valor medido, X_{k-1} : estimación previa.

$$X_k = K_k * Z_k + (1 - K_k) * X_{k-1} \quad (2.2)$$

$$X_k = \mathbf{A}X_{k-1} + \mathbf{B}u_k + W_{k-1} \quad (2.3)$$

$$Z_k = \mathbf{H}x_k + v_k \quad (2.4)$$

con una actualización del tiempo (predicción) dada por

$$X_k = x_{k-1} \text{ and } P_k = P_{k-1} \quad (2.5)$$

Mientras que el error de covarianza es actualizada siguiendo

$$X_k = \mathbf{A}x_{k-1} + \mathbf{B}u_k$$

$$P_k = \mathbf{A}P_{k-1}\mathbf{A}^T + Q$$

La medición actualizada (corrección) es dada por:

$$K_k = \left(\frac{P_k}{P_k + R} \right) \quad (2.6)$$

donde R es el ruido en el ambiente o en el sensor.

La ganancia de Kalman del filtro es dada por

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (2.7)$$

con la estimación final dada por z_k

$$X_k = x_k + K_k(z_k - Hx_k) \quad (2.8)$$

y con el error de covarianza actualizada por

$$P_k = (1 - K_k H) P_k \quad (2.9)$$

La ecuación 2.3 se usa para determinar que cada x_k (estimación actual) puede ser evaluada usando una ecuación estocástica lineal. Cualquier x_k es una combinación lineal de su valor anterior más una señal de control k y un ruido de proceso. La mayor parte del tiempo, no hay una señal de control u_k .

La ecuación 2.4 implica que cualquier valor de medición es una combinación lineal del valor de la señal y del ruido de medición. Tanto el ruido del proceso como el del sensor se consideran gaussianos. Ahora, debido a la relativa velocidad lenta de los procesos naturales que se miden y estiman. El ruido del proceso y el ruido de medición se consideran a su vez estadísticamente independientes.

Una vez obtenida una medición válida $z(k)$, el sistema trata de hallar el retardo estimado $x(k)$ siguiendo el algoritmo de un filtro lineal de Kalman. El filtro completo de Kalman actúa sobre un modelo descrito por el siguiente juego de ecuaciones [46]:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(k) &= \mathbf{F}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{v}(k) \\ \mathbf{z}(k) &= \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}(k)\mathbf{w}(k)\end{aligned}\tag{2.10}$$

donde

- $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado
- $\mathbf{u}(k) \in \mathbb{R}^s$ es una entrada conocida de control
- $\mathbf{v}(k) \in \mathbb{R}^q$ es una variable aleatoria que describe la incertidumbre de evolución del estado con covarianza $\mathbf{Q}(k)$
- $\mathbf{F}(k)$ es la matriz $n \times n$ de modelo de estado
- $\mathbf{B}(k)$ es la matriz $n \times s$ entrada
- $\mathbf{G}(k)$ es la matriz $n \times q$ de ruido
- $\mathbf{z}(k) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de observación
- $\mathbf{w}(k) \in \mathbb{R}^r$ es una variable aleatoria que describe la incertidumbre en la observación, con covarianza $\mathbf{R}(k)$
- $\mathbf{H}(k)$ es la matriz $n \times n$ de modelo de observación
- $\mathbf{D}(k)$ es la matriz $n \times s$ de ruido de observación

Para este tipo de modelo, se puede definir el algoritmo de Kalman como un proceso recursivo de predicción y actualización. La predicción de la observación se lleva a cabo a partir de las observaciones hechas hasta el instante $k-1$ y se define como

$$\hat{\mathbf{z}}(k|k-1) = \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)\tag{2.11}$$

y la predicción del estado actual se obtiene aplicando la ecuación del modelo

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k)\tag{2.12}$$

La innovación introducida por la nueva observación $\mathbf{z}(k)$ se define como

$$\nu(k) = \mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \quad (2.13)$$

La covarianza de la innovación es

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{R}(k) + \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) \quad (2.14)$$

con $\mathbf{P}(k|k-1)$ la predicción de la covarianza de estimación, $\mathbf{R}(k)$ la covarianza de la observación. Esta innovación, junto con la predicción de estado, produce la estimación de estado actual según

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{W}(k)\nu(k) \quad (2.15)$$

con una covarianza de estimación

$$\mathbf{P}(k|k) = \mathbf{P}(k|k-1) - \mathbf{W}(k)\mathbf{S}(k)\mathbf{W}^T(k) \quad (2.16)$$

y una matriz de ganancia

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}(k)\mathbf{S}^{-1}(k) \quad (2.17)$$

donde la predicción de la covarianza de estimación es

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (2.18)$$

Ahora, en nuestro caso, se puede simplificar el sistema tomando las siguientes consideraciones relativas a un filtro de estado estacionario (o filtro $\alpha\beta$) [46]

1. El filtrado es sincrónico cuando se procesa una señal estable por un tiempo determinado en que se asegura la presencia de esa señal.
2. Las matrices de estado y de observación son invariantes en el tiempo.
3. Utilizamos variables escalares, no vectoriales, por lo que las matrices se transforman en simples constantes o variables.
4. En el caso de \mathbf{F} y \mathbf{H} , estas constantes son iguales a 1. Las matrices de covarianza $\mathbf{Q}(k)$ y $\mathbf{R}(k)$ se transforman respectivamente en las varianzas σ_V^2 y σ_W^2 .
5. Las matrices de covarianza de estimación ($\mathbf{P}(k|k)$) y de ganancia ($\mathbf{W}(k)$) son valores escalares, que tienden a sendos estados estacionarios de varianza de estimación y de ganancia: σ_P^2 y W .

De lo anterior, las ecuaciones del sistema se reducen a las expresadas continuación.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k|k-1) &= \hat{x}(k-1|k-1) \\ \hat{z}(k|k-1) &= \hat{x}(k|k-1) \\ \hat{x}(k) &= \hat{x}(k|k-1) + W\nu(k) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Para obtener la ganancia W , se aplica la ecuación (2.14) con las simplificaciones anotadas, tal que la varianza de estimación se reduce a

$$\sigma_P^2(k|k-1) = \sigma_P^2(k-1|k-1) + \sigma_V^2(k) \quad (2.20)$$

y la varianza de la innovación se vuelve

$$s(k) = \sigma_W^2(k) + \sigma_P^2(k|k-1) = \sigma_W^2 + \sigma_P^2(k-1|k-1) + \sigma_V^2(k) \quad (2.21)$$

Con esta varianza de innovación, la ganancia $W(k)$ es entonces

$$W(k) = \frac{\sigma_P^2(k|k-1)}{s(k)} = \frac{\sigma_P^2(k-1|k-1) + \sigma_V^2(k)}{\sigma_W^2(k) + \sigma_P^2(k-1|k-1) + \sigma_V^2(k)} \quad (2.22)$$

Puesto que la ganancia $W(k)$ converge a un valor estable W , es posible hallar este valor de antemano, en vez de calcularla en cada paso del filtro. Este valor se puede lograr simulando el filtro fuera de línea (lo que no requiere hacer ninguna observación, y precisa solo los valores de varianza de σ_V^2 y σ_W^2) y usar la ganancia W como constante dentro del filtro. Todo lo anterior simplifica enormemente la implementación del filtro en un simple sistema embebido como el propuesto en esta tesis, al no ser necesario ejecutar costosas multiplicaciones y divisiones en el estimador.

F, **B** y **H** son matrices variables en el tiempo que representan el modelo dinámico del sistema. Teniendo en cuenta que el flujo de drenaje es extremadamente lento en comparación con el muestreo utilizado por el sistema (ajustable, 10 minutos), que sólo se utiliza una variable de entrada y que el rango dinámico de datos está bien delimitado, estas matrices se transforman en constantes como los vectores de medida y estimación y las matrices de covarianza. Esto hace que la aplicación sea más que adecuada para un microprocesador.

El cálculo en el microprocesador del sistema se simplificó aún más utilizando un valor constante para el Ganancia de Kalman obtenido sin conexión. Esto ahorra el tiempo de cálculo adicional requerido por la ecuación 2.7, y se consideró como una opción segura en términos de velocidad de procesamiento.

Las pruebas de laboratorio se utilizaron entonces para calcular la ganancia óptima de Kalman que aseguró una exactitud de $\pm 1\%$, usando muestras de agua calibradas de 300 mililitros. Como se ha explicado, el ruido de los sensores también se modeló estadísticamente bajo condiciones de laboratorio. En la tabla 2.4 se muestran los datos obtenidos mediante las pruebas de laboratorio y el uso del filtro de Kalman. En la tabla 2.5 se evidencia el resultado de los valores promedio y de desviación estándar para los datos obtenidos en la medición del flujo de líquido para determinar el valor del drenaje.

Las pruebas de laboratorio se realizaron para comprobar la funcionalidad del sistema de medición de drenaje de forma automática. Una vez finalizadas dichas pruebas, se procedió a poner en práctica las pruebas de campo. El sistema fue instalado en el invernadero durante dos meses periodo durante el cual fue posible constatar su funcionalidad y facilidad de uso, así como la precisión de los sensores.

Tabla 2.4: Predicción y corrección de la medición de drenaje mediante el filtro de Kalman- prueba en laboratorio.

k	$z(k)$	$\hat{\mathbf{x}}(k-1)$	$\hat{\mathbf{x}}^-(k)$	$P^-(k)$	$K(k)$	$\hat{\mathbf{x}}(k)$	$P(k)$
1	310	300	300	1	0,45	304,46	0,55
2	301	0,00	304,46	0,55	0,31	303,39	0,38
3	295	303,39	303,39	0,38	0,24	301,41	0,29
4	292	301,41	301,41	0,29	0,19	299,62	0,24
5	307	299,62	299,62	0,24	0,16	300,80	0,20
6	307	300,80	300,80	0,20	0,14	301,66	0,17
7	301	301,66	301,66	0,17	0,12	301,58	0,15
8	305	301,58	301,58	0,15	0,11	301,95	0,13
9	298	301,95	301,95	0,13	0,10	301,56	0,12
10	292	301,56	301,56	0,12	0,09	300,71	0,11

Tabla 2.5: Parámetros estimados del sensor de flujo, modelado estadísticamente bajo condiciones de laboratorio.

<i>Sensor</i>	<i>Promedio (mililitros)</i>	<i>Desviación estándar</i>
Medidor de flujo en líquidos	302	1,243

En la figura 2.2 se detalla esquemáticamente cada uno de los componentes del sistema: tuberías de suministro de fertirriego, líneas de suministro, plántulas en sustrato de fibra de coco, drenaje, sensor de flujo, medición (flujo), filtro de Kalman, corrección del dato medido y por último se envía el dato corregido a Internet. Se puede acceder a Internet por medio de dispositivos móviles o estaciones remotas.

En el caso particular de la medición de drenaje automatizada, en la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de la medición de drenaje con la indicación de los litros recolectados, fecha y hora de la toma del dato.

En la vida real ninguna señal es Gaussiana pura, pero podemos asumir esto con alguna aproximación. Un filtro de Kalman intenta converger en estimaciones correctas, incluso si los parámetros de ruido gaussianos son mal estimados [47].

En resumen, el sistema adquiere datos de flujo de drenaje, lo filtra usando el algoritmo de Kalman incorporado y luego envía esto junto con los datos de las otras variables medidas a través de una red GSM/GPRS a una plataforma IoT, donde los valores capturados están representados gráficamente con una marca de tiempo y una fecha. Esta base de datos remota está conectada a Internet, donde los investigadores pueden realizar varios análisis de datos en línea

En la figura 2.4 se muestra la forma de recolección manual (envase plástico blanco bajo la base de madera) en la cual se evidencia que el drenaje es recolectado en un contenedor plástico sin ningún tipo de indicación de medida. En el sistema de recolección automático se ha implementado la posibilidad de medir por medio de los contenedores calibrados

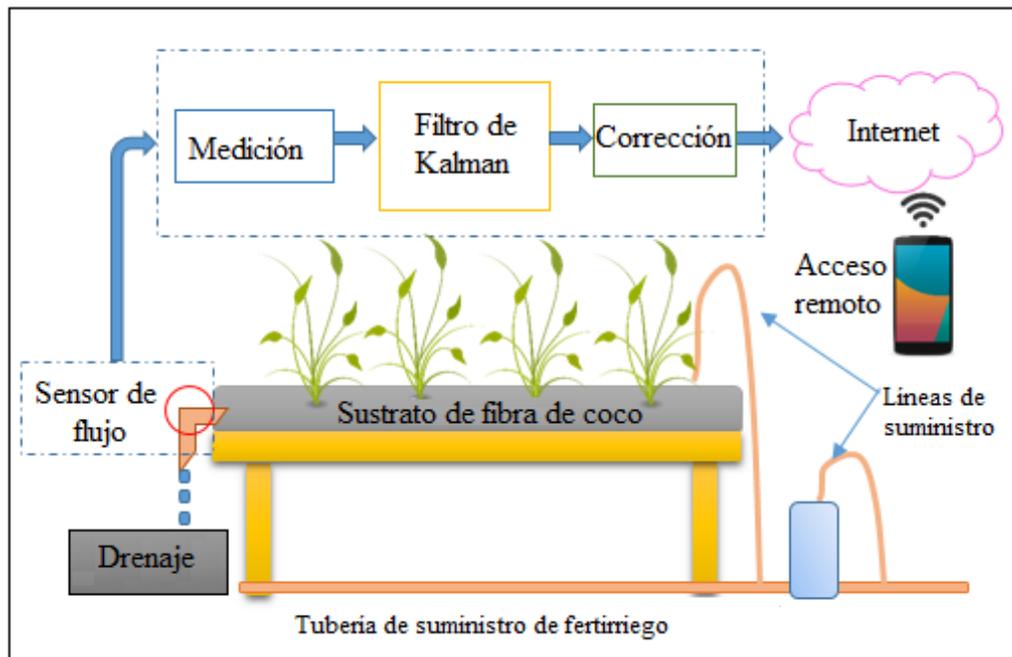


Figura 2.2: Esquemático de las pruebas de campo realizadas para la aplicación del filtro de Kalman en las mediciones de drenaje.

(manual) y por la medición de flujo (automático). En la figura 2.3 se evidencia que el día jueves 07 de diciembre a las 21:02:29 horas se guardó un dato de medición de drenaje con un valor de 1.7 litros.

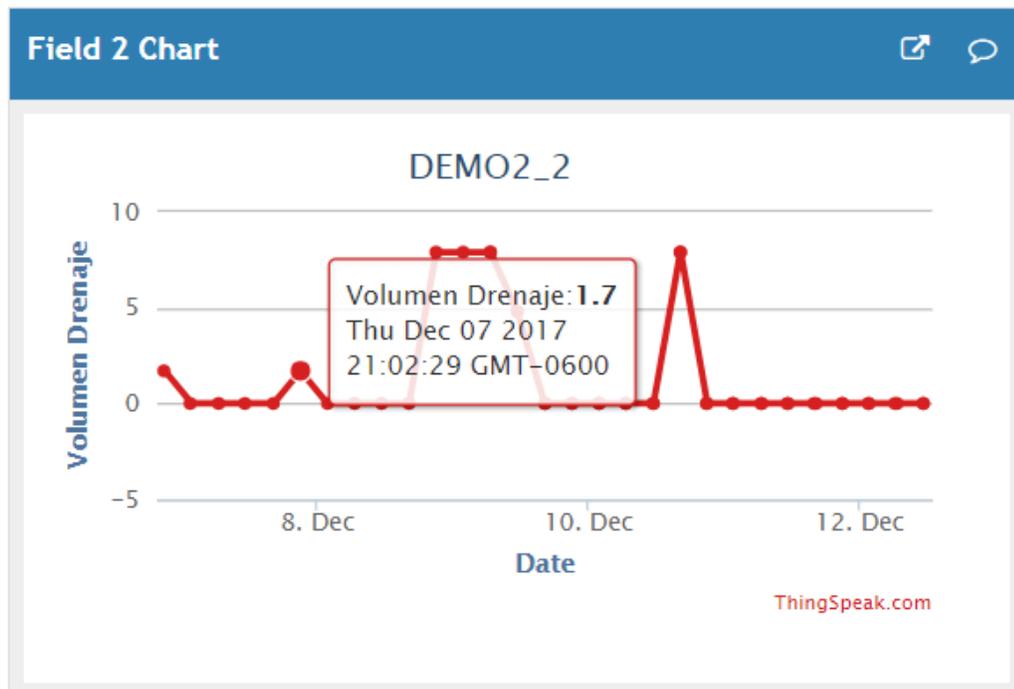


Figura 2.3: Despliegue de la medición de drenaje en el sistema de IoT ThingSpeak, dato de 1.7 litros obtenido el 07 de diciembre del 2017.

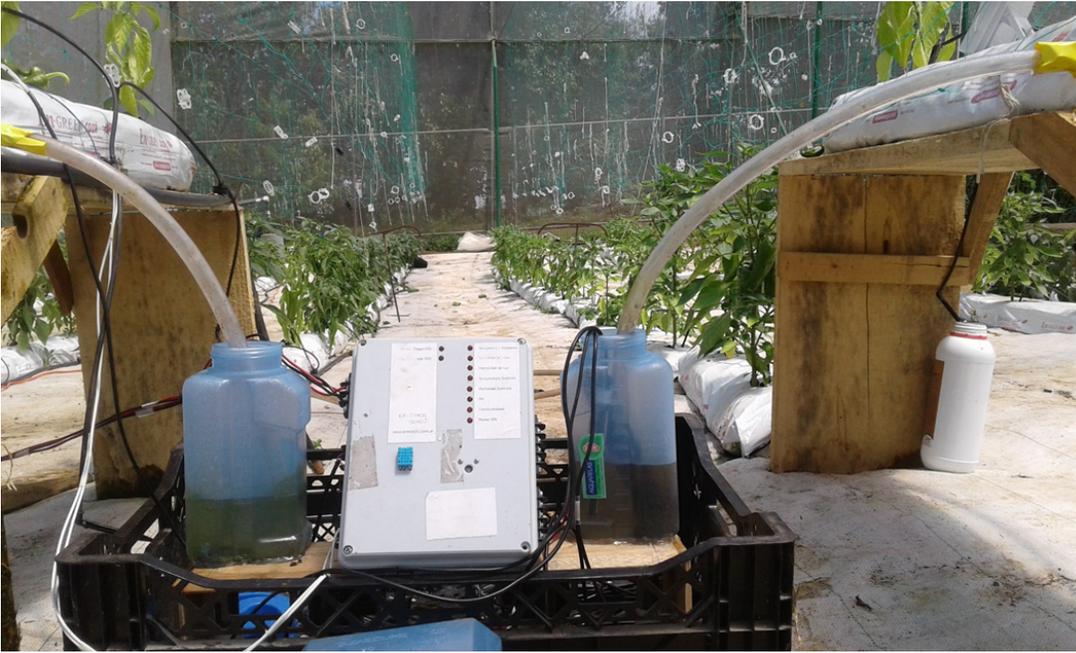


Figura 2.4: Método manual y automático de medición de drenaje en ambientes protegidos.

2.3.4 Conexión a la nube

En el capítulo 5 se explicará con más detalle sobre la integración de la mediciones de drenaje y CE para la aplicación final de estimación fuzzy. Por ahora se ofrece un breve resumen para ilustrar el proceso de conexión a la nube para mostrar los datos de drenaje.

Los invernaderos normalmente se encuentran alejados de puntos de conexiones físicas (cabledas) que permitan tener acceso a Internet. Dado lo anterior, fue necesario seleccionar una tarjeta que permitiera conectividad de manera inalámbrica, se programó un sistema GSM/GPRS (Sistema global para servicios móviles/de paquetes generales de radio) para recopilar datos medidos y enviarlos a un proveedor de servicios de IoT. Para el desarrollo de esta tesis doctoral se seleccionó la plataforma ThingSpeak [8].

ThingSpeak es una aplicación de código abierto IoT y API (Application Programming Interface) para almacenar y recuperar datos de cosas usando el protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) a través de Internet. Con dicha plataforma es posible la creación de aplicaciones de registro de sensores, seguimiento, red social con actualizaciones de estado, y cuenta con soporte integrado del software de cálculo numérico MATLAB de MathWorks. Además, los usuarios pueden analizar y visualizar los datos cargados usando Matlab sin requerir la compra de una licencia Matlab de Mathworks. Se desarrolló entonces el sistema descrito en la figura 2.4, en el capítulo 5 se describirá con más detalle todo lo relacionado con la aplicación de IdC.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Mediciones por medio de la plataforma de Internet de las Cosas

La Figura 2.5 muestra el proceso de entrenamiento del filtro de Kalman hecho sin conexión a la nube. Los puntos de color azul representan el valor medido ($z(k)$) y los de color rojo los valores calculados por el filtro de Kalman ($x(k)$), es evidente que los datos obtenidos por el filtro de Kalman e integrados en el sistema de adquisición de datos, cumplen con el requerimiento de mejorar la precisión del sensor de flujo. Por lo anterior, los datos muestran estabilidad en las diez mediciones, los datos estimados tienen un promedio de 300,71, lo que representa un error de $\pm 1\%$ considerando la calibración de 300 mililitros usada, se logra una clara mejora con respecto a la exactitud del sensor $\pm 10\%$ según su hoja de datos, ver nuevamente tabla 2.3.

Los investigadores pueden acceder a la aplicación ThingSpeak utilizando cualquier dispositivo con conexión a Internet y un navegador web. Es necesario un nombre de usuario y una contraseña para iniciar sesión en la plataforma. Se registraron más de 10000 medicio-

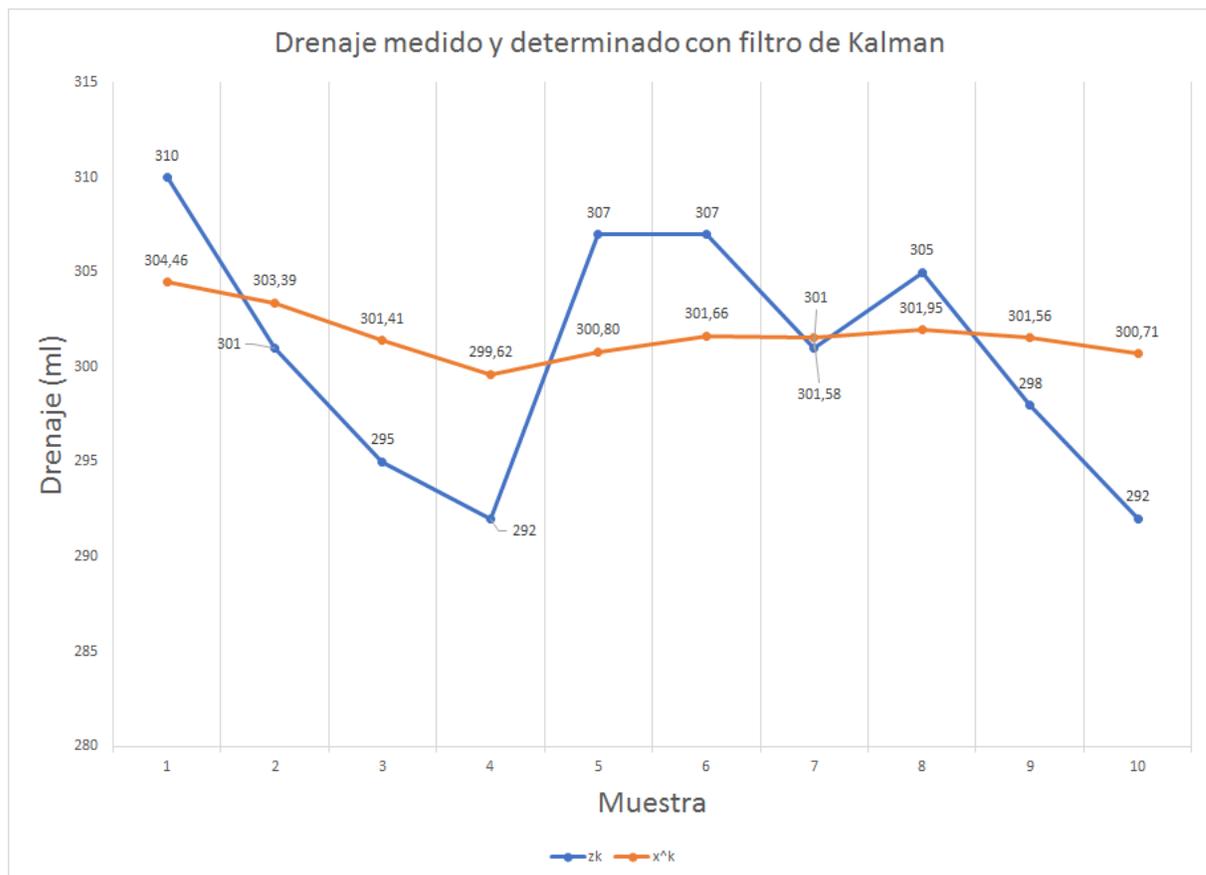


Figura 2.5: Predicción y corrección de la medición de drenaje mediante el filtro de Kalman, $z(k)$ es el valor medido y $x(k)$ valor calculado.

nes con sellos de tiempo y fechas durante 4 meses. De forma manual fue posible recopilar 100 mediciones durante el mismo periodo de toma de datos automática.

En el capítulo 4, se toma como punto de partida los resultados de medición de drenaje de este capítulo y del sensor de conductividad eléctrica del capítulo 3 para establecer un modelo de lógica difusa que permite la toma de decisiones sobre fertirriego. Cabe destacar, que el modelo propuesto puede ser ampliado en cuanto a entradas y por lo tanto permitirá analizar variables secundarias para anticipar el desarrollo estructural del proceso de crecimiento de las plantas y maximizar la producción de hortalizas, minimizando el uso de agua, nutrientes y fertilizantes.

2.5 Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema electrónico asequible basado en hardware y software, que se utiliza para mejorar automáticamente la precisión de la medición de drenaje en horticultura de invernadero, las capacidades de Internet de las Cosas son evidenciadas. Fue posible mejorar la precisión en las mediciones mediante el uso del filtro de Kalman, de manera que quedó demostrado el potencial del sistema. Específicamente, para la medición automática de drenaje, la exactitud fue mejorada diez veces con respecto a las especificaciones técnicas del sensor, pues, según la hoja de datos técnicos brindada por el proveedor el medidor de flujo de líquido indica una precisión de $\pm 10\%$, mientras que el resultado final tras el filtrado de Kalman implementado alcanzó una precisión de $\pm 1\%$. Dicho sistema de medición ha sido totalmente integrado a la nube para su uso durante mediciones masivas y automáticas.

El uso del sistema IdC permite la incorporación de sensores asequibles ajustados a través de algoritmos de fusión de datos estándar, como el filtrado de Kalman y otras técnicas que se ejecutan en la nube o en el propio sistema, como fue realizado en el capítulo 2. El acceso del sistema a las herramientas analíticas y gráficas de IdC le permite a los investigadores tomar decisiones más inteligentes y rápidas, con la asistencia potencial del procesamiento de toma de decisiones, como los controladores de lógica difusa, que serán propuestos y desarrollados en los capítulos 4 y 5.

Capítulo 3

Sensor de conductividad eléctrica para medios acuosos altamente salinos

En la metodología de trabajo establecida por los investigadores para los cultivos de hortalizas sin suelo, es necesario realizar mediciones de conductividad en los envases de recolección de drenaje con el fin de determinar el nivel de aprovechamiento de los nutrientes suministrados por el sistema de fertirriego. Dado lo anterior, el método manual obliga a la medición diaria de la cantidad y CE del drenaje.

En el capítulo 2 se mostró el sistema diseñado para la medición del drenaje. En el presente capítulo se diseña, construye, calibra, y prueba un sensor de conductividad para medios acuosos altamente salinos que tiene la capacidad de permanecer sumergido en el tanque de preparación y almacenamiento de los nutrientes que serán proveídos a los cultivos a través del fertirriego.

Los sustratos de fibra de coco utilizados en el cultivo hidropónico están compuestos de un material inerte, por lo tanto todos los requerimientos nutricionales de las plantas deben ser suministrados por medio del fertirriego, tanto la solución de nutrientes como el drenaje son altamente salinos y por ende el sensor que permanecerá sumergido para determinar la conductividad debe ser resistente a dicho medio acuoso. El sensor es utilizado para medir la CE del drenaje en forma automatizada y con interconexión a una plataforma de Internet de las Cosas. Como resultado final de este desarrollo, se alcanzó una patente sobre el sensor, cuyo detalle puede revisarse en el apéndice A.

Por lo general, los sensores utilizados para determinar la CE en medios acuosos tienen el inconveniente de que no pueden permanecer sumergidos por largos periodos de tiempo ya que son diseñados explícitamente para medir y mostrar de forma instantánea el dato medido y la persona encargada de registrar dichos datos debe hacerlo manualmente en la bitácora del cultivo.

Durante la realización del proyecto elaborado en la pasantía de doctorado, se planteó como

objetivo general “evaluar el efecto del cambio climático en la producción de hortalizas utilizando ambientes protegidos como una forma para definir estrategias que permitan enfrentar el impacto de este fenómeno” [23]. El mayor inconveniente que se presentó durante el periodo de ejecución de la pasantía fue el deterioro repetitivo del sensor de humedad utilizado en el sustrato de fibra de coco. El promedio de vida de cada sensor era aproximadamente de un mes y el lapso entre cada medida automatizada fue de 10 minutos, 24 horas al día, durante 100 días.

En la sección de recomendaciones del informe de pasantía [23] se propuso lo siguiente:

1. Desarrollar un sensor de humedad de suelo que no se deteriore por la exposición a los productos utilizados en el proceso de riego en los cultivos hidropónicos.
2. Desarrollar un sensor de conductividad eléctrica con una precisión igual o superior a los dispositivos comerciales.
3. Establecer, en conjunto con los investigadores involucrados en el proyecto, las variables primarias y secundarias de mayor impacto para la generación de modelos de crecimiento y rendimiento de hortalizas hidropónicas cultivadas en ambientes protegidos.

A partir de la recomendación dos del proyecto de pasantía se justificó la necesidad de un sensor de conductividad eléctrica con una precisión igual o superior a los dispositivos comerciales.

3.1 Comparación entre una aleación de nicromio y otra desconocida perteneciente a un sensor.

Se inicia con el proceso de búsqueda de un material que pueda ser utilizado para la construcción de un sensor de conductividad y que además, tenga la capacidad de permanecer por periodos superiores a un mes en un medio altamente salino, como lo es la solución de nutrientes utilizada en los cultivos hidropónicos.

El material nicromo o nicromio (con una composición nominal en porcentaje de 20% Cromo y 80% Niquel, según datos de fabricante [42]) es comparado con una aleación, de composición desconocida, perteneciente al sensor de humedad de suelo utilizado durante el proyecto de pasantía [23, 40]. Para la realización del experimento comparativo se propusieron los siguientes materiales [2]:

1. Probetas de una aleación de nicromio con un área expuesta de $0,322 \text{ cm}^2$ para todas las probetas, cuatro probetas en total.
2. Probetas de una aleación desconocida perteneciente a un sensor. (N1= $0,2869 \text{ cm}^2$, N2= $0,2858 \text{ cm}^2$, N3= $0,3099 \text{ cm}^2$, N4= $0,3134 \text{ cm}^2$).

3. Solución de nutrientes como electrolito (composición según criterio de experto [12]).

En el procedimiento metodológico planteado para el experimento se propusieron tres métodos comparativos:

1. Circuito de potencial abierto (*Open circuit potential*, OCP por sus siglas en inglés), durante 30 min (1800 s).
2. Espectrometría de impedancia electroquímica (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*, EIS por sus siglas en inglés), con una perturbación sinusoidal de ± 10 mV de 10 puntos por cada década en un intervalo de frecuencias de 100 kHz a 10 mHz.
3. Curvas potencio-dinámicas de polarización (*Potentiodynamic polarization curves*), a una velocidad de 5 mV/s.

Para todas las mediciones se utilizó un electrodo de referencia de Ag/AgCl (3 M KCl) y un contraelectrodo de platino. Las medidas fueron hechas en 50 ml de la solución de nutrientes a temperatura ambiente. Todas las mediciones de corriente fueron racionalizadas al área de la probeta expuesta.

Los resultados de las mediciones son contundentes en todos los métodos empleados en lo que respecta a la superioridad del material Nicromio vrs la aleación desconocida del sensor original. Las tablas, datos numéricos y gráficos serán incluidos en un artículo científico por recomendación del Dr. Luis Cordero, ingeniero en materiales del CIEMTEC. Las curvas potencio-métricas de polarización son incluidas como comparativo de la supremacía del nicromio como material altamente resistente al medio utilizado.

En la figura 3.1 se evidencia que las curvas potencio-dinámicas de polarización para la aleación de nicromio y la aleación desconocida (electrodo inicial), presenta una zona de pasivación, siendo esto un comportamiento típico para aleaciones con alto contenido de níquel y cromo. Para el caso de la aleación desconocida (electrodo inicial) se observa que los brazos anódicos de todas las probetas están considerablemente adelantados cuando se comparan con los de nicromio, lo que comprueba una mayor cinética de corrosión. Mediante los resultados de potencial de corrosión y velocidad de corrosión (densidad de corriente) calculados a partir de la figura 3.1, se enfatiza que la aleación desconocida presenta un menor potencial de corrosión (-763 ± 14 mV) que la aleación de nicromio (-784 ± 7 mV), por lo que aparentemente es más estable termodinámicamente. Sin embargo, se debe mencionar que en el momento de la medición la aleación desconocida presentaba ya una capa de productos de corrosión sobre su superficie, lo que le aporta estabilidad al sistema y a la vez sirve de aislante para un menor intercambio de masa. Lo anterior debe de analizarse considerando los resultados de OCP donde el nicromio era mucho más estable. Al analizar la cinética de corrosión se observa como la aleación de nicromio presenta una menor velocidad de corrosión, determinadas a partir de los datos extraídos de las curvas potencio-dinámicas, ($5 \pm 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) cuando se compara con la aleación desconocida ($18 \pm 4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Esta variación debe ser aún mayor cuando

se considera que los productos de corrosión adheridos a la superficie de las probetas de aleación desconocida disminuyen el intercambio de electrones y masa al tener un efecto resistivo.

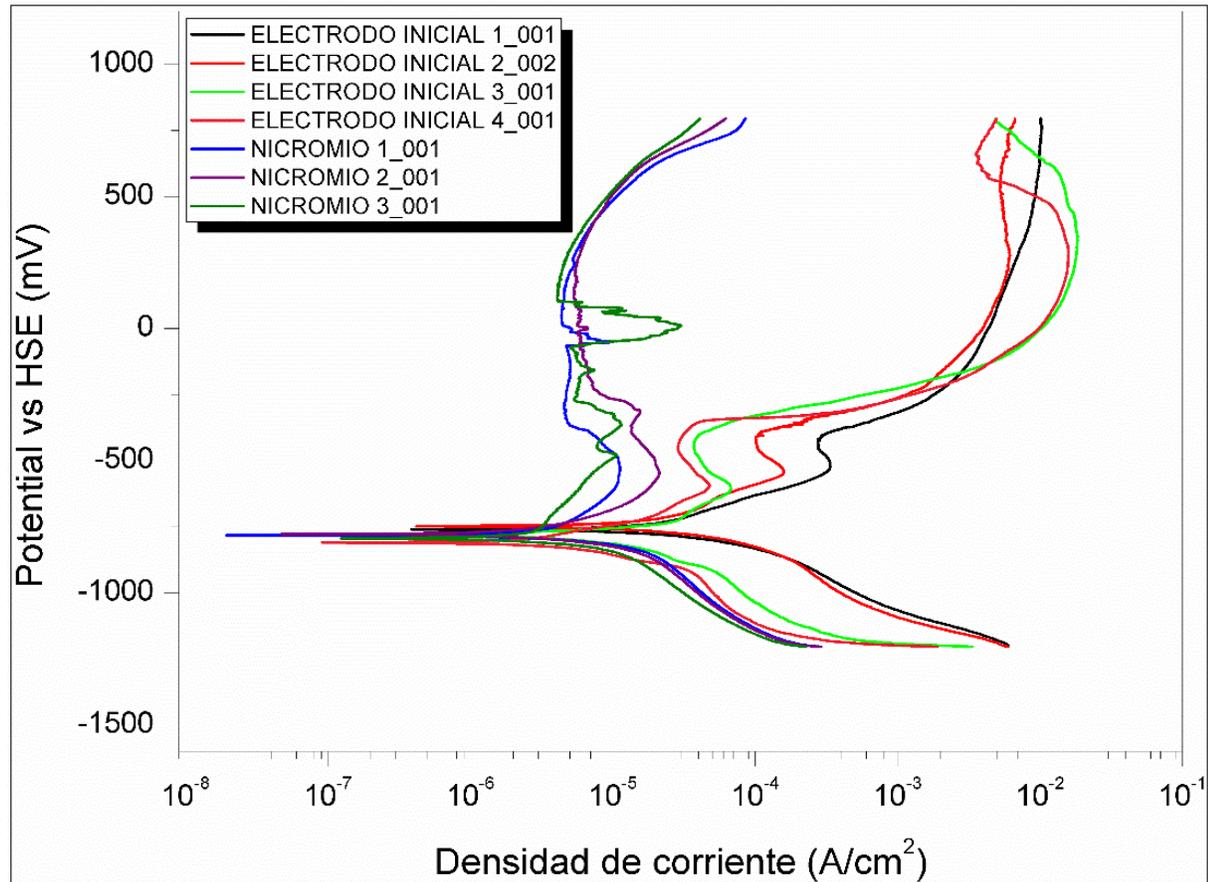


Figura 3.1: Curvas potencio-dinámicas de polarización para la aleación de nicromio y la aleación desconocida (electrodo inicial) [2].

A partir de la comprobación de que el nicromio es altamente resistente a un medio altamente salino como lo es la solución de nutrientes, se procede a la realización de pruebas metalográficas y exposición en cámara salina a dicha aleación.

3.2 Pruebas metalográficas y en cámara salina para comprobar características de resistencia de los electrodos de nicromio.

El objetivo de las pruebas metalográficas y en la cámara salina consiste primordialmente en poder establecer si el material seleccionado cumplirá con los requerimientos para lograr la automatización de la medición de CE.

A continuación, se detallan y ejecutan ensayos no destructivos en una “Cámara salina de

corrosión acelerada” ubicada en el Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El material original son probetas de aleación de nicromio con un sujetador de aleación posiblemente a base de cobre. Los aspectos dimensionales consisten en una probeta de aproximadamente diez centímetros y un sujetador de aproximadamente dos centímetros.

3.3 Ensayos de corrosión acelerada en cámara salina.

Los ensayos de corrosión acelerada en cámara salina tienen como objetivo exponer las probetas a condiciones de salinidad extrema en cortos periodos de tiempo de manera tal que sea posible determinar el posible deterioro o cambio metalográfico de las muestras en el largo plazo. Este ensayo se elaboró bajo principios generales establecidos por la norma ASTM A117, excluyendo apartados propios a la forma de la probeta y a limpieza posterior de las probetas a causa de los resultados obtenidos. La concentración salina en agua fue de 5 ± 1 %wt./wt [3].

Se evaluaron un total de 24 probetas de nicromio. Se dividieron las probetas en grupos de cuatro (4), donde cada grupo se sometió a diferentes tiempos de análisis en la cámara de corrosión acelerada, modelo SSC-400, las cuales se encuentran expuestas a un medio salino. El ensayo se realizó durante 24, 48, 72, 120, 144 y 168 horas. Se determinó el peso de cada probeta antes y después del ensayo. Además, se utilizó una probeta en su estado de suministro como medio de comparación. En la tabla 3.1 se muestran los resultados de los diferentes pesos, en esta se logra observar que no existe un cambio representativo en el peso y de existir, este no representa un valor significativo. Lo anterior es evidencia de una elevada resistencia a la corrosión presentada por las probetas ante el ataque de cloruros en un ambiente salino de alta humedad.

En la figura 3.2 se muestran las probetas a diferentes horas de exposición, donde se realizó la toma de una foto por grupo a los diferentes tiempos de exposición. Como se puede observar las probetas después de ser sometidas al ambiente salino no presentaron ningún cambio apreciable al compararlas con las probetas en estado original. No hay evidencias de cambios de coloración ni puntos de inicio de corrosión, tanto generalizados como localizados. Las aleaciones de nicromio por lo elementos químicos base que poseen, a saber cromo y níquel, pueden presentar corrosión por el mecanismo de picadura, también conocido por el término en inglés *pitting* (picadura), en este caso no se observa evidencia de *pitting* en la superficie al ser analizadas a diversos aumentos en el lente.

3.4 Estudio metalográfico

Para evaluar posibles afectaciones por *pitting* a nivel subsuperficial se procedió con la realización de un estudio microestructural a través de ensayos metalográficos. Primero se procedió a realizar la caracterización de las inclusiones no metálicas y discontinuidades

Tabla 3.1: Datos de peso para ensayo en cámara salina, evidencia que no existe cambio significativo en el peso posterior al tiempo de exposición [3].

Probeta	Día de la semana	Tiempo de exposición (h)±1/10	Peso inicial (g)±0,00001	Peso de extracción (g)±0,00001	Cambio de peso (g)
1	Miércoles	24	1,5168	1,5168	0,0000
2			1,5605	1,5604	-0,0001
3			1,4814	1,4812	-0,0002
4			1,5158	1,5158	0,0000
5	Jueves	48	1,5024	1,5024	0,0000
6			1,4719	1,4715	-0,0004
7			1,4765	1,4765	0,0000
8			1,4178	1,4176	-0,0002
9	Viernes	72	1,4948	1,4948	0,0000
10			1,5132	1,5134	0,0002
11			1,5125	1,5124	-0,0001
12			1,5277	1,5282	0,0005
13	Lunes	120	1,4841	1,4848	0,0007
14			1,4805	1,4811	0,0006
15			1,4742	1,4752	0,0010
16			1,4889	1,4891	0,0002
17	Martes	144	1,5256	1,5266	0,0010
18			1,5051	1,5063	0,0012
19			1,5156	1,5173	0,0017
20			1,4627	1,4642	0,0015
21	Miércoles	168	1,5319	1,5338	0,0019
22			1,5155	1,5168	0,0013
23			1,4992	1,5000	0,0008
24			1,4461	1,4475	0,0014

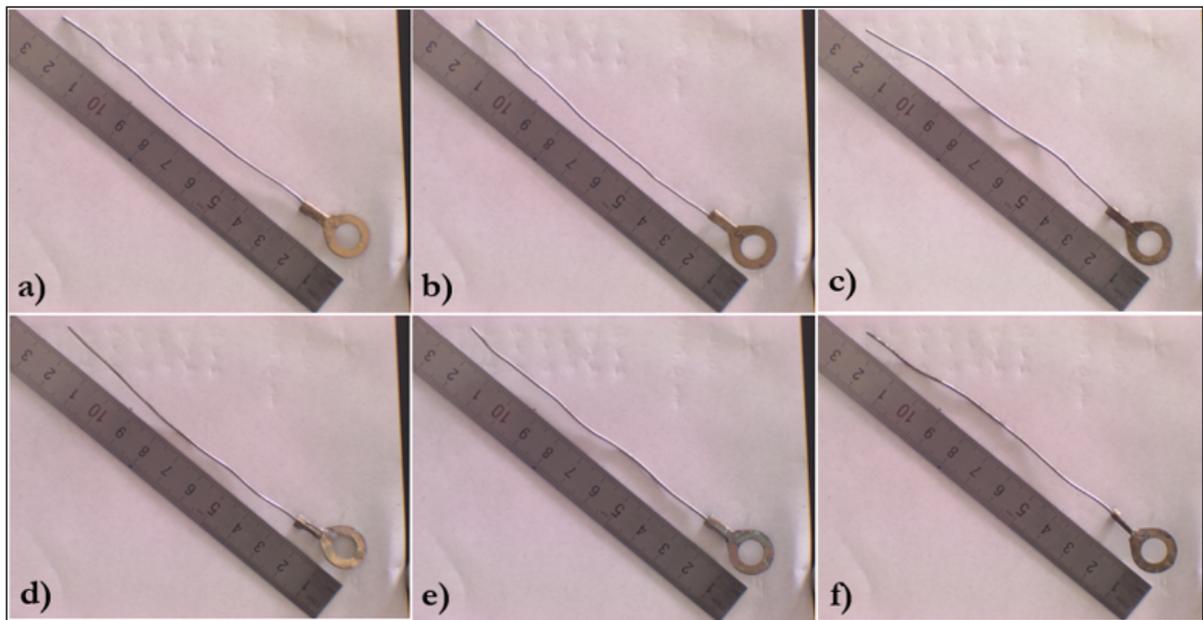


Figura 3.2: Fotografías de probetas a diferentes horas de exposición en cámara salina. a) probeta a las 24 horas, b) probeta a las 48 horas, c) probeta a las 72 horas, d) probeta a las 120 horas, e) probeta a las 144 horas, f) probeta a las 168 horas. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].

en la aleación, donde se utilizó la probeta en estado de suministro (probeta número 25) y una probeta sometida a 144 horas en la cámara de corrosión (probeta número 20), la cual fue la que presentó mayor corrosión superficial por inspección visual (prácticamente nula). Se logra observar en la figura 3.3(a) y figura 3.3(b) una estructura monofásica con inclusiones no metálicas distribuidas uniformemente y de morfología globular. La cantidad de inclusiones es considerable.

Posteriormente, se realizaron dos ataques metalográficos. El primer ataque se realizó con ácido nítrico al 65% en una disolución acuosa (50 ml agua destilada y 50 ml ácido nítrico). Dicha disolución se llevó a una temperatura entre los 90-100 °C por un tiempo entre los 30 a 60 s. Dicho ataque no reveló ninguna estructura o fase adicional en la aleación.

Se realizó un segundo ataque con una disolución de 80 ml de ácido nítrico al 65% y 3 ml de ácido fluorhídrico al 40%; la probeta se precalentó antes de realizar el ataque. En la figura 3.4 a) y 3.4 b) se observan las probetas después del segundo ataque, donde no se visualizan evidencias de corrosión. Dicho resultado concuerda con lo expuesto en el sección relacionada con los ensayos de corrosión acelerada en la cámara salina.

3.5 Curvas potencio-dinámicas de polarización

En la figura 3.5 se presentan los resultados de corrosión para la aleación de nicromio en diferentes medios. Como se puede observar no hay una diferencia significativa en la

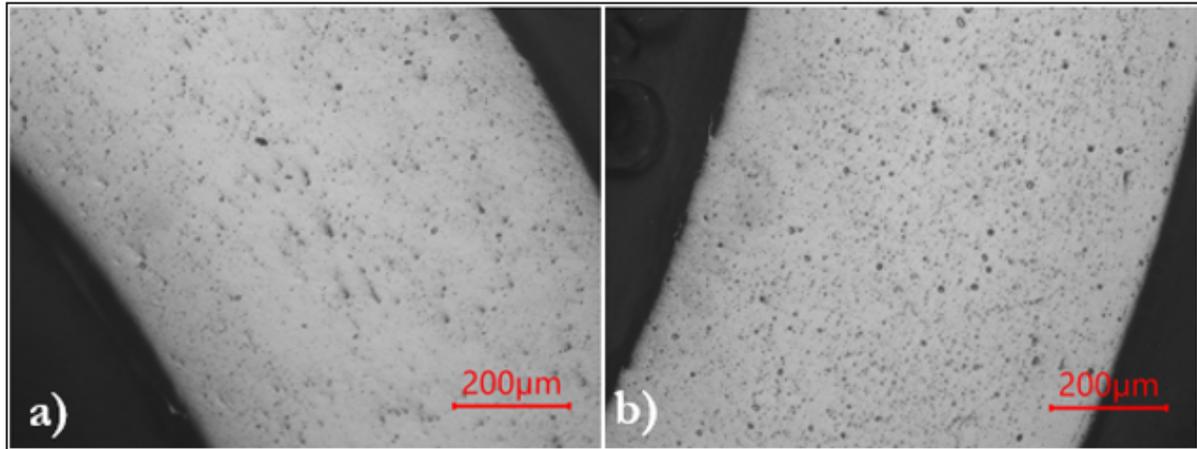


Figura 3.3: Metalografías para las probetas de nicromio en estado de suministro a) y sometida a la cámara de corrosión durante 144 horas sin ataque b). 100X. Escala 200µm. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].

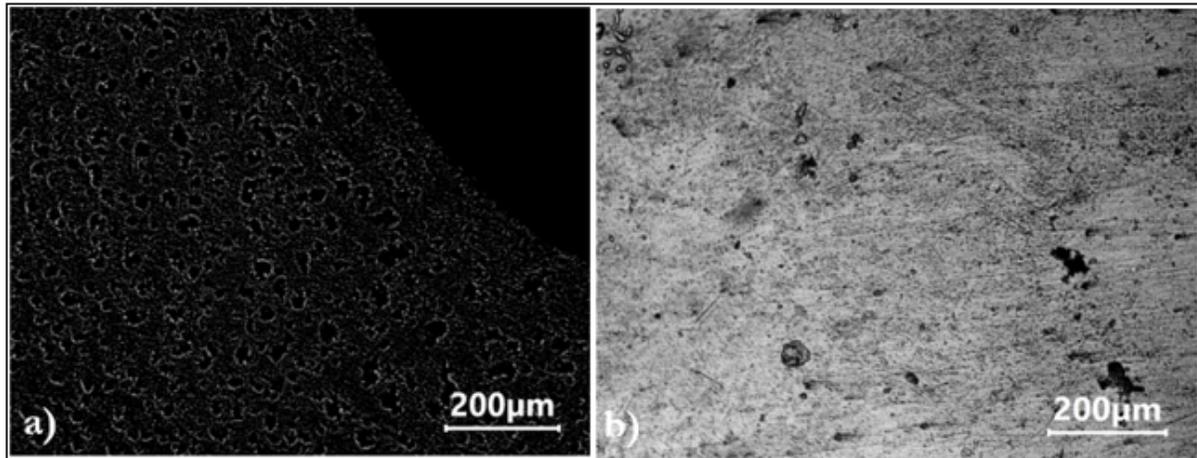


Figura 3.4: Metalografías para las probetas de nicromio en estado de suministro a) y sometida a la cámara de corrosión durante 144 horas b). Atacada químicamente en una disolución de ácido nítrico al 65% y ácido fluorhídrico al 40%; 100X. Escala 200µm. Nótese la ausencia de un efecto corrosivo determinante a simple vista [3].

cinética de corrosión de la aleación según el medio, lo que indica, al compararse con el agua, que la aleación tiene un comportamiento similar en los otros dos medios. La curva de Nutriente 1 presenta un cinética un poco mayor que la del Lix 1, lo que conforma la caída en fuerza iónica del medio, siendo esto normal por la pérdida de nutrientes. En cuanto a la tendencia de corrosión, Nutriente 1 y Lix 1 presentan una menor tendencia que Agua 4, pero siendo esta ligera. Esto debe ser analizado a la luz de los valores de pH.

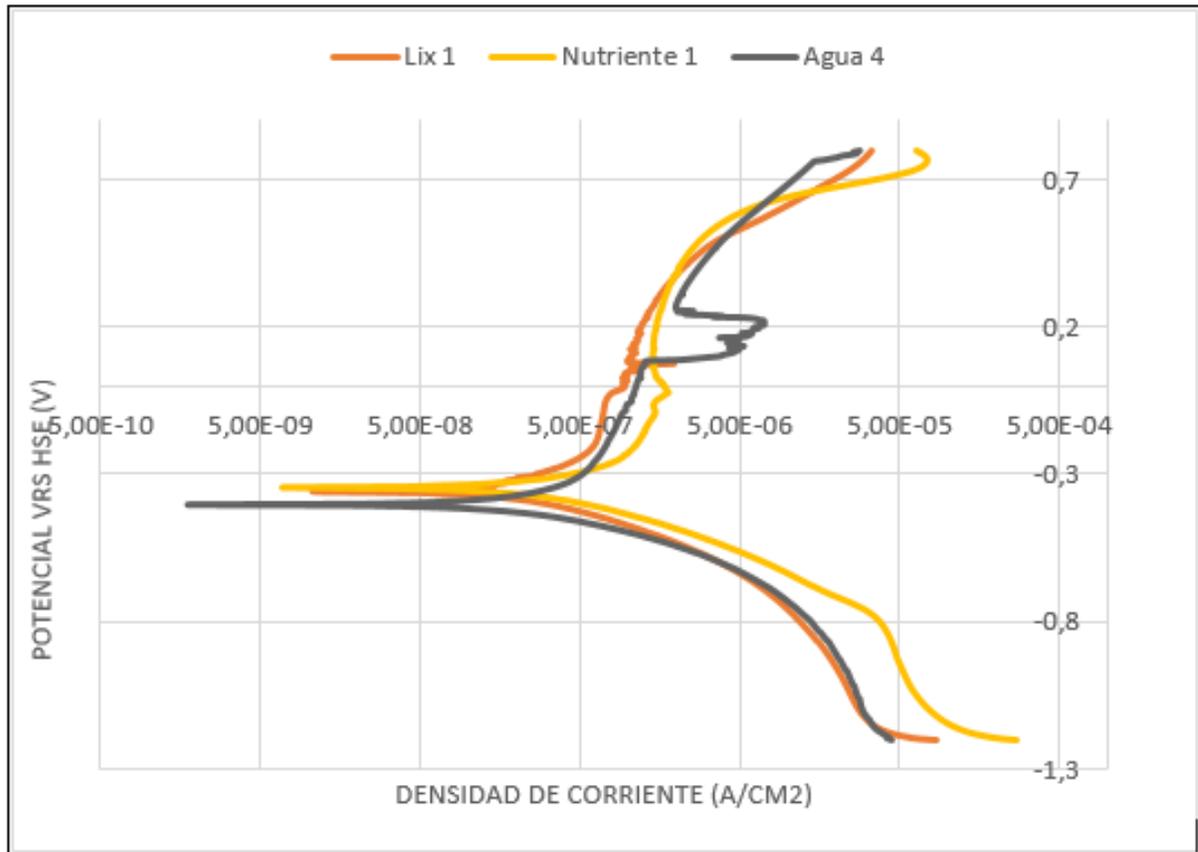


Figura 3.5: Curvas potencio-dinámicas de polarización para la aleación de “nicromio” en agua desionizada (Agua 4), en nutriente fresco (Nutriente 1) y en el lixiviado (Lix 1). Nótese que no hay evidencia significativa de cambio en la cinética de corrosión del electrodo según el medio de evaluación [3].

3.6 Pruebas de comprobación en cada electrodo

Posterior a la exposición en la cámara salina, se procedió a corroborar si los electrodos habían tenido algún deterioro y para ello se realizaron mediciones de corriente y de conductividad. Específicamente, se utilizaron sustancias patrón de 84, 1413 y 12880 micro Siemens/cm para contrastar las mediciones de conductividad eléctrica con cada electrodo y determinar las curvas de tendencia.

3.6.1 Medición de corriente en cada electrodo

Con el fin de determinar si posterior a la exposición a la cámara salina los electrodos experimentaron algún cambio en sus características eléctricas se realizó la medición de la corriente eléctrica en miliamperios (mA) por medio de una fuente de precisión a una tensión fija de cinco (5) milivoltios (mV). La fuente de precisión utilizada fue el modelo B2902A de la marca Agilent; dentro de sus características más relevantes vale la pena destacar que la resolución mínima de medida es de 100fA/100nV; la resolución mínima de la fuente es de 1pA/1micro V. Esta fuente es recomendada para la caracterización precisa de “Dispositivos bajo prueba” (*Device Under Test*, DUT por sus siglas en inglés). En la figura 3.6 se muestra un esquemático del circuito elaborado para las mediciones de cada electrodo con las sustancias patrón de conductividad.

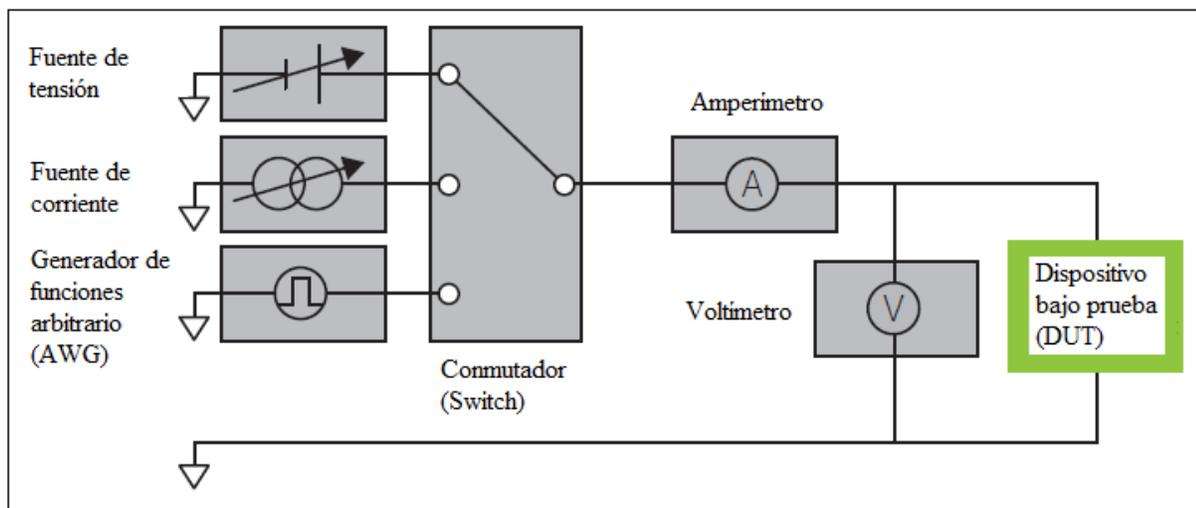


Figura 3.6: Esquemático de circuito interno y externo a la fuente de medición para determinar la corriente de cada electrodo (llamado acá DUT) [4].

Con la medición de datos de corriente realizados mediante las pruebas 1 y 2 a los electrodos (ver tabla 3.2), fue posible determinar gráfica y numéricamente (ver figuras 3.7 y 3.8) que los elementos bajo prueba no experimentaron ningún tipo de deterioro que afectara el comportamiento eléctrico del mismo. Para la elaboración de los gráficos se consideraron los valores máximos y mínimos de corriente y la media respectiva. Además, se evidencia la linealidad del valor medio determinado, es importante destacar que la incertidumbre asociada a la medición de corriente es de $\pm 0,02\%$ (mA).

3.6.2 Medición de conductividad en cada electrodo

En esta sección se detallan los resultados obtenidos para las pruebas comparativas de cada electrodo con respecto a sustancias patrón de conductividad eléctrica para 84, 1413 y 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cada medición fue realizada utilizando las muestras expuestas a la cámara de corrosión acelerada. En las tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se detallan los resultados experimentales para las sustancias patrón de 84, 1413 y 12280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C.

Tabla 3.2: Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia que no hay un cambio significativo en las mediciones de tensión y corriente para los tiempos de exposición.

Probeta	Tiempo de exposición (h) $\pm 1/10$	Prueba 1 Tensión (mV) $\pm 0,015\%$	Prueba 1 Corriente (mA) $\pm 0,02\%$	Prueba 2 Tensión (mV) $\pm 0,015\%$	Prueba 2 Corriente (mA) $\pm 0,002\%$
1	24	4,9957	2,69984	5,0000	2,72986
2		4,9986	2,62312	5,0000	2,70863
3		4,9961	2,68015	5,0000	2,73036
4		4,9959	2,66441	5,0000	2,73050
5	48	4,9969	2,69269	5,0000	2,73237
6		4,9945	2,70077	5,0000	2,69253
7		4,9947	2,69642	5,0000	2,73996
8		4,9981	2,66461	5,0000	2,71784
9	72	4,9957	2,69916	5,0000	2,73399
10		4,9968	2,69147	5,0000	2,69172
11		4,9958	2,63288	5,0000	2,71659
12		4,9956	2,69116	5,0000	2,70748
13	120	4,9950	2,67401	5,0000	2,69887
14		4,9962	2,71427	5,0000	2,70543
15		4,9964	2,62276	5,0000	2,68232
16		4,9953	2,66035	5,0000	2,70193
17	144	4,9964	2,62358	5,0000	2,65368
18		4,9962	2,67669	5,0000	2,72137
19		4,9967	2,69907	5,0000	2,70022
21	168	4,9990	2,50334	5,0000	2,52335
22		4,9990	2,56698	5,0000	2,66136
23		4,9958	2,65978	5,0000	2,62487
24		4,9988	2,57720	5,0000	2,70076

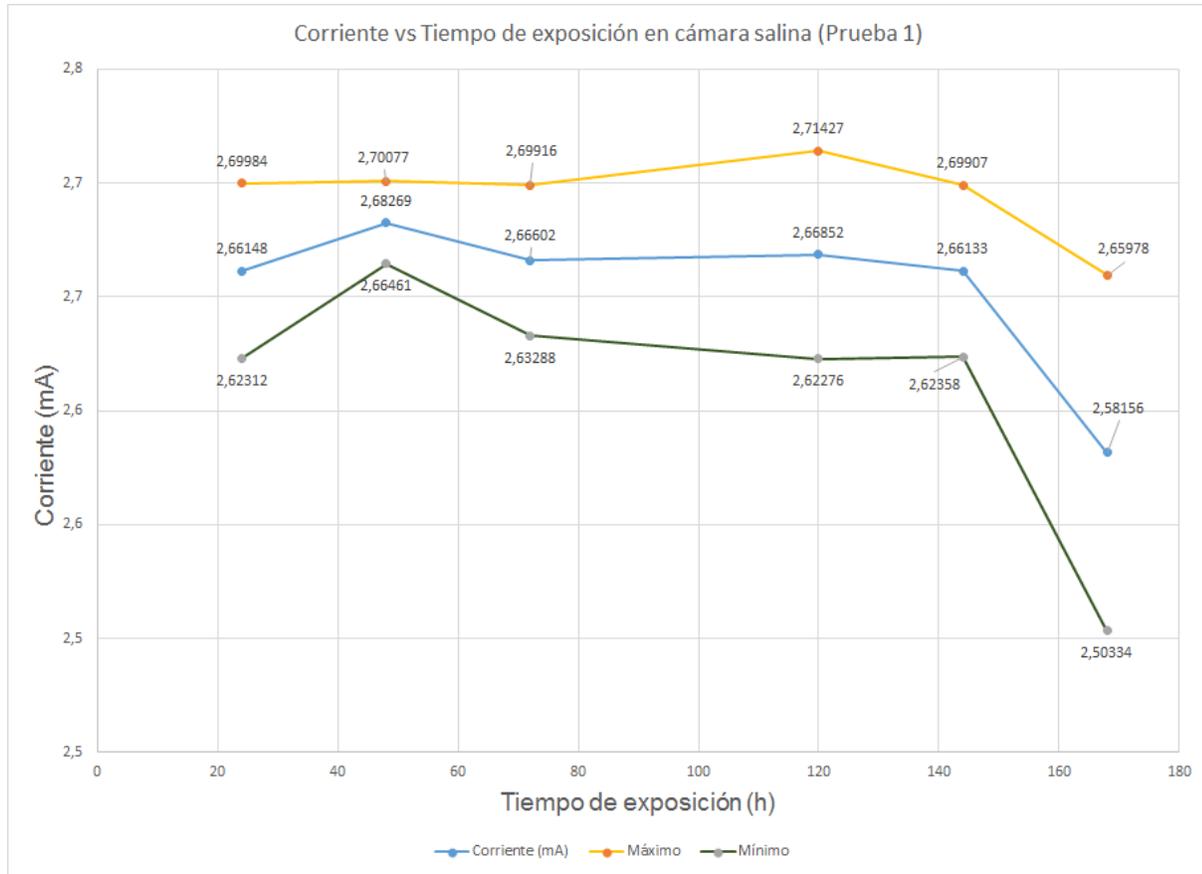


Figura 3.7: Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de corriente.

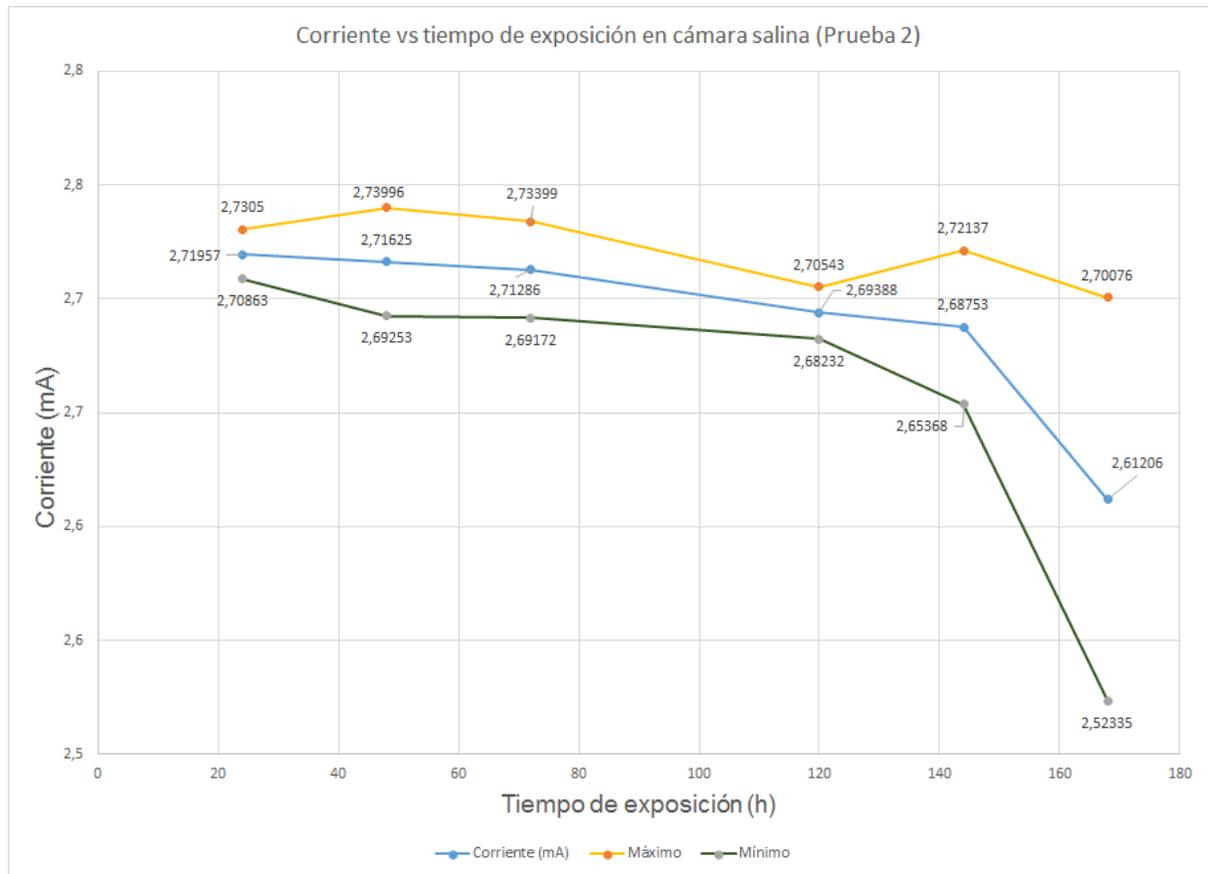


Figura 3.8: Datos de corriente medidos para cada electrodo mediante el uso de fuente de precisión Agilent. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de corriente.

Tabla 3.3: Resultados experimentales para sustancia patrón de $84 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Tiempo de exposición (h)	Valor medio Dato 1	Valor medio Dato 2	Valor promedio
0	79,59	79,27	79,43
24	79,98	79,95	79,96
48	78,98	78,40	78,69
72	78,85	78,84	78,85
120	78,39	79,09	78,74
144	79,09	79,41	79,25
168	79,94	80,59	80,26

Tabla 3.4: Resultados experimentales para sustancia patrón de $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C

Tiempo de exposición (h)	Valor medio Dato 1	Valor medio Dato 2	Valor promedio
0	1373,51	1362,86	1368,19
24	1364,71	1380,40	1372,55
48	1370,18	1370,72	1370,45
72	1372,03	1372,15	1372,09
120	1363,72	1379,95	1371,84
144	1367,08	1376,95	1372,02
168	1377,54	1373,56	1375,55

Se realizaron 136 muestras para cada par de electrodos, con intervalos de un segundo cada uno. La medición fue registrada automáticamente en una tabla y posteriormente se determinaron los valores medios, varianza, coeficiente de variabilidad, entre otros. El detalle completo de los datos se ha incluido en el Apéndice 2 el cual se ha dedicado exclusivamente a los resultados experimentales en la medición de conductividad con sustancias patrón.

Como prueba de la funcional a lo largo del tiempo de cada electrodo se determinó la línea de tendencia. Se evidencia gráfica y numéricamente, la poca variabilidad de los datos medidos con respecto a las sustancias patrón. Es importante destacar que la conductividad eléctrica es dependiente de la temperatura, por lo tanto para cada una de las 136 muestras por cada par de electrodos, se midió la temperatura con el fin de poder realizar la comparación según los datos de fabricante de cada sustancia patrón.

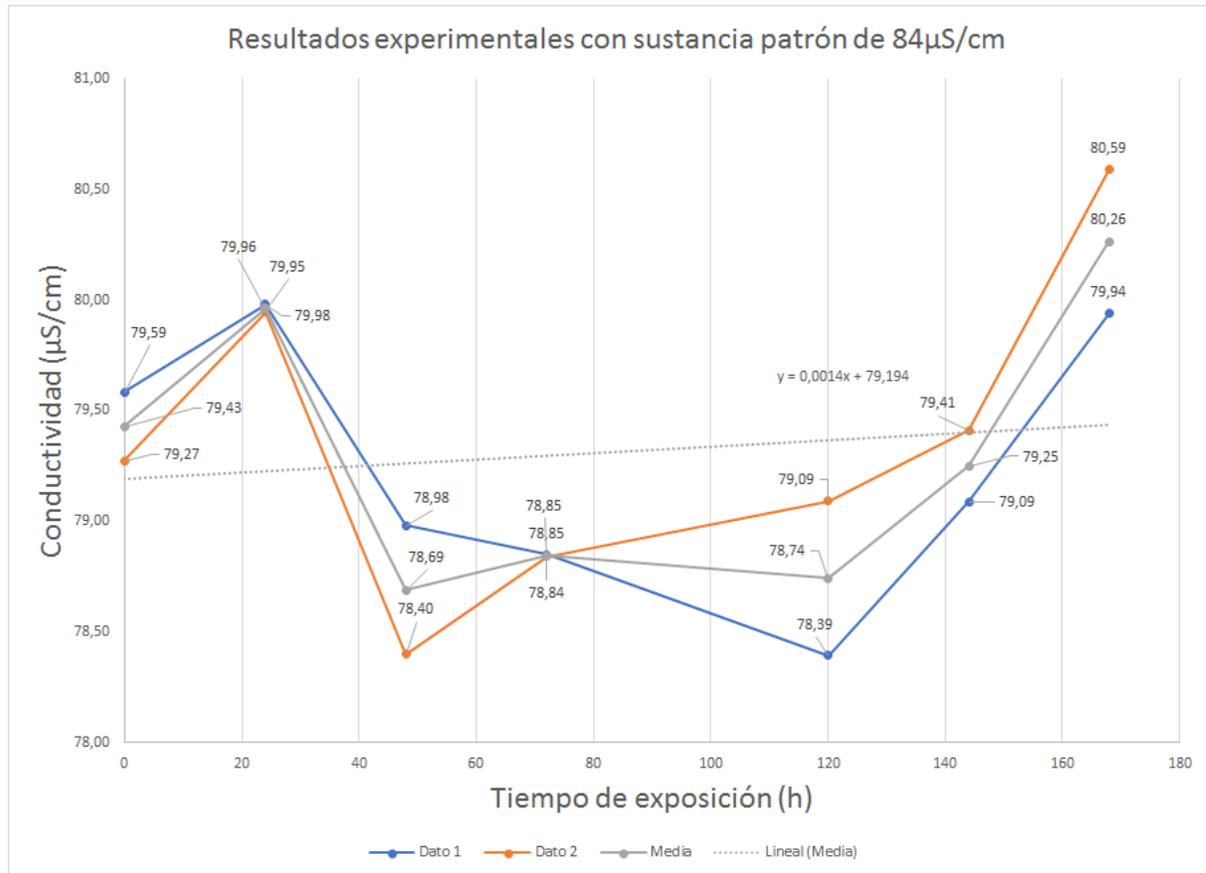


Figura 3.9: Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de 84 μ S/cm. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.

Tabla 3.5: Resultados experimentales para sustancia patrón de 12880 μ S/cm a 25°C

Tiempo de exposición (h)	Valor medio Dato 1	Valor medio Dato 2	Valor promedio
0	12322,70	12263,93	12293,32
24	12711,81	12604,12	12657,97
48	12702,40	12848,36	12775,38
72	12743,11	12676,31	12709,71
120	12483,07	12627,89	12555,48
144	12204,79	12270,20	12237,49
168	12212,72	12285,16	12248,94

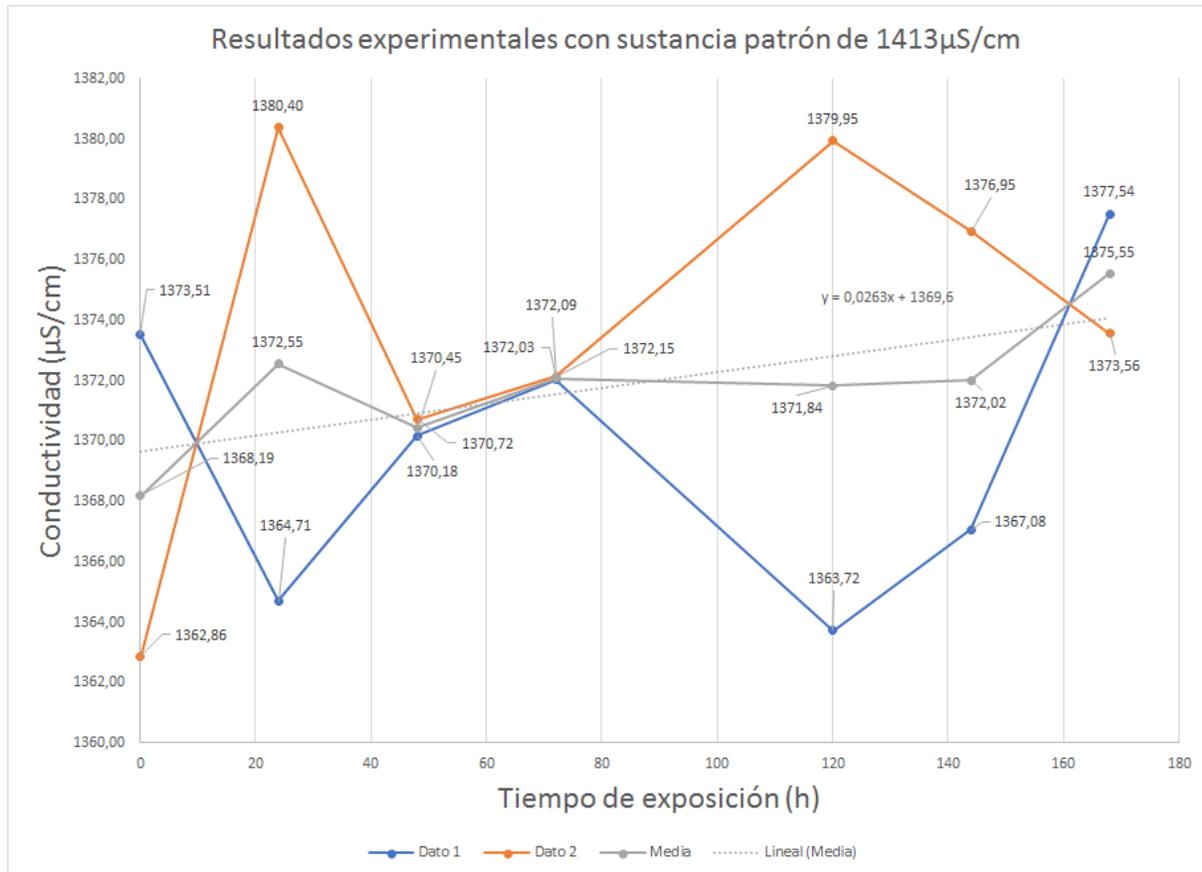


Figura 3.10: Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de $1413\mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.

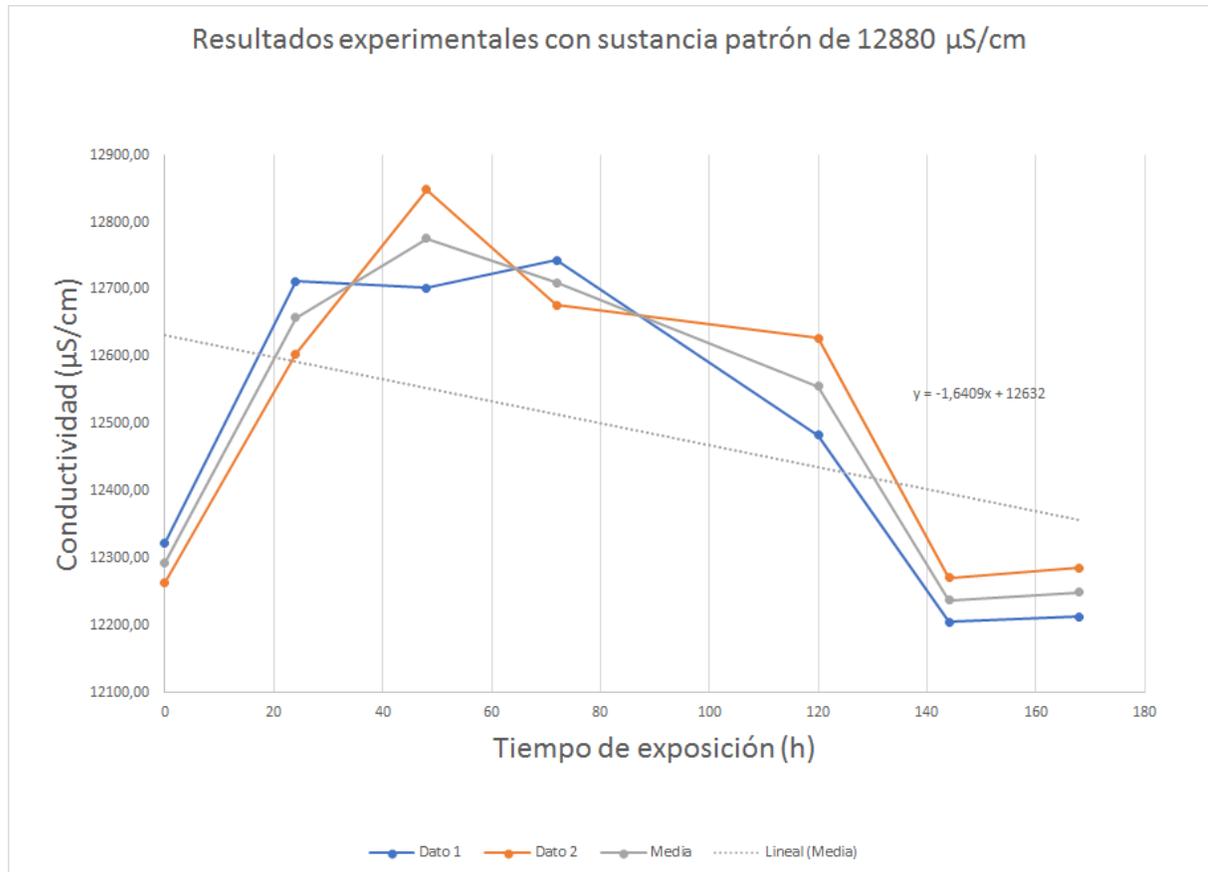


Figura 3.11: Resultados experimentales para cada par de electrodos utilizando sustancia patrón de 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se evidencia gráficamente que el tiempo de exposición de las probetas en la cámara salina no afecta las mediciones de conductividad con respecto a la sustancia patrón.

3.7 Descripción técnica de sensor de conductividad

Se ofrece acá una descripción técnica del sensor desarrollado para la medición de conductividad, junto con el circuito electrónico necesario. Cabe destacar que esta descripción es un resumen de la patente de invención sometida a inscripción en el Registro Nacional de Costa Rica con el número de solicitud 01/2017-000516, presentada el día diez de noviembre del 2017 a las 08:56:54. Para más detalle, se adjunta en el Apéndice A la redacción completa de la patente.

3.8 Conclusiones

El material nicromio presenta características metalográficas idóneas en comparación con el material original para ser utilizado como electrodo en medios acuosos altamente salinos.

La aleación presenta una elevada resistencia a la corrosión cuando es evaluada bajo la norma ASTM A117. Las probetas no presentan señales de corrosión significativas ni evidentes cuando se evalúa de forma superficial y subsuperficial. El comportamiento electroquímico de la aleación cuando es evaluada en tres diferentes medios es prácticamente el mismo.

Por lo tanto, las probetas expuestas al protocolo de pruebas en la cámara de corrosión acelerada fueron sometidas a mediciones de corriente y de conductividad mediante el uso de sustancias patrón. Los resultados experimentales obtenidos evidencian numérica y gráficamente que los electrodos son resistentes a medios acuosos altamente salinos y que se mantendrá la medición de conductividad eléctrica dentro de los rangos aceptables de acuerdo a la temperatura del medio acuoso. Los resultados fueron contundentes para justificar la aplicación a la patente de invención, en proceso de otorgamiento, titulada “CR20170516 (A) - Sensor de conductividad resistente a medios acuosos altamente salinos” (donde la A representa el estado de publicación y CR es por Costa Rica).

Capítulo 4

Modelado de un controlador de lógica difusa para la toma de decisiones relacionadas con fertirriego

En la práctica, productores e investigadores miden diariamente y manualmente: cantidad de drenaje y CE del drenaje y toman decisiones considerando términos lingüísticos como: agua fácilmente disponible, agua difícilmente disponible, conductividad baja, conductividad buena, entre otros. Por lo anterior, en el capítulo 2 se desarrolló todo lo relacionado con la automatización de la medición del drenaje, y en el capítulo 3 se incorporó al sistema la medición automática de CE en el cultivo hidropónico.

En el presente capítulo se toman en consideración el drenaje y CE con el fin de establecer criterios para programar el sistema de fertirrigación (agua + nutrientes), la pregunta es ¿cómo se pueden tomar decisiones relacionadas con el riego, a partir de las variables de entrada: drenaje y CE?. La programación del fertirriego puede mejorar la producción y calidad de los cultivos, reducir el desperdicio de agua y minimizar la acumulación de sales en el sustrato que afecta al crecimiento de las plantas. Dado lo anterior, se propone un modelo de lógica difusa para la toma de decisiones mediante la evaluación de los términos lingüísticos relacionados con la medición del drenaje y la CE. La incertidumbre léxica dada por la “disponibilidad del agua” y la “conductividad” es cuantificada mediante un valor numérico dentro de un Modelo de Lógica Difusa (*Fuzzy Logic Model*, FLM por sus siglas en inglés). Como resultado se logra incorporar el conocimiento humano estructural sobre la programación de riego en un modelo analítico de lógica difusa, obteniéndose una herramienta de toma de decisiones sobre la programación de la fertirrigación de cultivos sin suelo en horticultura protegida.

Como producto final de este capítulo, se propone el uso de un controlador de lógica difusa para optimizar la toma de decisiones relacionadas con el riego en cultivos hidropónicos en ambientes protegidos. En el artículo presentado en el primer Congreso Latinoamericano

de Doctorado en Microelectrónica y Electrónica (PRIME-LA 2017) [5] y publicado en IEEE Xplore se detallan los primeros resultados considerando inicialmente una única variable de entrada, el drenaje. Además, también se presentan los resultados obtenidos considerando dos conjuntos de variables lingüísticas de entrada: drenaje y conductividad eléctrica; y una salida, fertirriego. El controlador propuesto fue presentado en la Congreso Internacional de Astronáutica (IAC-2017), específicamente en el Simposio de aplicaciones integradas - Herramientas y tecnologías de soporte a aplicaciones integradas [9].

4.1 Introducción

Se propone un controlador de lógica difusa para la evaluación del drenaje de agua con el fin de determinar si el contenido de agua está fácilmente disponible para los cultivos; la incertidumbre léxica dada por “fácilmente disponible” se cuantificó en un valor numérico en este primer enfoque. El resultado es un controlador preliminar que incorpora el conocimiento humano estructural sobre la programación de riego en un modelo analítico de lógica difusa (FLM), con el fin de proporcionar a los científicos agrícolas acceso rápido a las variables principales de producción y crecimiento relacionadas con un determinado cultivo y permitir datos futuros decisiones sobre el terreno. El controlador fue validado con datos reales recogidos de un cultivo en particular, utilizando sensores remotos conectados a Internet.

Estudios recientes han demostrado que el cambio climático está afectando la disponibilidad de agua en todas partes, lo cual tiene un impacto directo en las actividades agrícolas [25, 24, 14]. Este es el caso en los cultivos de hortalizas sin suelo (sustrato) en invernadero, donde se necesita una planificación de riego óptima para influir positivamente en el entorno de las raíces de las plantas y en su proceso de fotosíntesis.

Existen dos tipos de métodos de riego: convencional y proporcional. El riego convencional se aplica durante largos períodos y con grandes cantidades de agua, aumentando la salinidad del suelo o del sustrato. El riego proporcional utiliza periodos cortos de tiempo y se aplica con frecuencia; este procedimiento reduce el desperdicio de agua, mejorando la producción de los cultivos. El conocimiento del uso consuntivo (relativo al consumo) de los principales cultivos, conocido como evapotranspiración (ET), es un requisito previo para el riego eficiente porque la cantidad de ET puede estar relacionada con el agua suministrada por el sistema de riego, el cambio en el agua almacenada en el sustrato y la cantidad de agua drenada fuera de la planta. La capacidad de almacenamiento de agua depende fuertemente del medio de cultivo; el medio sin suelo tiene menos capacidad de almacenamiento de agua que el suelo. El agua y los nutrientes se desperdician cuando se aplican durante un período de tiempo cuando la humedad relativa en el invernadero permanece en 100 %; por ejemplo, cuando la temperatura del aire y la temperatura del punto debido son similares, tal como lo explica Soto-Bravo en [36]. Según Savva [48], el cultivo de horticultura en invernadero reduce la ET a aproximadamente 70% con respecto a campo abierto, mejorando así el uso de agua en relación con el cultivo sin protección

del medio ambiente.

En general, un sistema de riego debe controlarse para proporcionar suficiente agua a las plantas, tomando la transpiración cerca de su valor potencial. Las mediciones del contenido de humedad del sustrato se evalúan para tomar decisiones sobre el riego: en la literatura especializada se da un énfasis importante al término "disponibilidad de agua", que limita la transpiración de la planta, lo que significa que el programa de riego debe reemplazar el agua perdida por el agua, la absorción de agua de las plantas y la evaporación de la zona de las raíces. Por otra parte, una deficiencia en el suministro de agua puede mejorar el nivel de estrés de los cultivos. Los investigadores y los productores deben garantizar que el estrés de los cultivos, observado o medido, se debe a un déficit de humedad en la raíz de la planta, y no a una enfermedad, una plaga o condiciones atmosféricas excepcionales [49].

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los científicos y productores agrícolas al abordar las decisiones dirigidas a mejorar el rendimiento de las cosechas o el uso del agua, es la confusión entre estos criterios léxicos establecidos en la literatura técnica. Además, muchos de los porcentajes utilizados para determinar las cantidades de agua o fertilizantes se basan en reglas prácticas, que a veces se derivan de años de experiencia en cultivos particulares en entornos particulares. Esto dificulta no sólo comparar o probar el rendimiento de cualquier método propuesto de riego o fertilización en entornos heterogéneos, sino también hacer incómodo y propenso a errores las tareas de monitoreo y toma de decisiones. Y aunque la medición fiable de las variables relacionadas con el crecimiento y el rendimiento de los cultivos no es nueva ni costosa gracias a Internet (véase [31], todavía no existen muchos modelos abstractos que puedan servir como herramientas rápidas de decisión para usuarios.

Ahora bien, la incertidumbre no estadística, o la confusión, se conoce como una propiedad inherente de un sistema que la mayor parte del tiempo no puede resolverse mediante simples observaciones. La teoría de lógica borrosa o difusa (*Fuzzy Logic Theory*, FLT en adelante) generalmente establece un marco matemático que modelará los procesos cognitivos humanos de una manera que puede ser resuelta por una computadora. Algunos autores como Zadeh definen la lógica difusa (*Fuzzy Logic*, FL en adelante) como un sistema lógico, que es una extensión de la lógica multivalor que pretende servir como una lógica para el "razonamiento aproximado" [50]. Los dos conceptos más importantes dentro de FL son los de una variable lingüística y la regla difusa *si-entonces*.

Las variables lingüísticas permiten la traducción del lenguaje natural a las declaraciones lógicas o numéricas que proporcionan las herramientas para el razonamiento aproximado, lo que significa que si los datos de medición están disponibles y existe un modelo difuso correctamente definido, es posible incorporar las reglas del lenguaje humano relacionadas con la disponibilidad de agua de la planta y sus implicaciones con respecto al riego, para un cultivo en particular.

En este capítulo de la tesis se propone una nueva forma de incluir los datos de recolección de drenaje y de CE, con el fin de proponer un modelo de decisión difuso de irrigación que

proporcione el control de salidas escalares de un sistema experto.

4.1.1 Toma de decisiones relacionadas con el riego

Típicamente, los sistemas desarrollados para tomar decisiones sobre el riego consideran variables como: temperatura interna o externa al invernadero, radiación solar, radiación solar acumulada, humedad del sustrato, hora del día, humedad relativa, entre otros. En el artículo publicado por Capraro et al. [51] se determina la humedad del suelo como variable de una red neural para un sistema de irrigación en agricultura de precisión. Valdés-Vela y otros [52] también consideran la humedad del sustrato en un sistema neuro-difuso. Por su parte, Schuguresnky y Capraro [53] proponen un sistema que permite fijar con precisión el valor de la humedad deseada en cada parcela a lo largo de toda la temporada de riego, de acuerdo con la etapa de desarrollo y crecimiento del cultivo. Por último Rice y otros [54, 55] establecen un sistema de predicción de la demanda de agua en tomate y chile dulce utilizando un red neuronal artificial (*Artificial Neural Network*, ANN por sus siglas en inglés) en la cual se consideran la radiación solar, temperatura externa, hora del día, entre otros.

Mediante la revisión bibliográfica realizada se logra constatar que los desarrollos propuestos utilizan redes neuronales, redes neuro-difusas y difusas evaluando factores diferentes al drenaje y conductividad eléctrica del drenaje para la toma de decisiones relacionadas con el riego de cultivos hidropónicos en ambientes protegidos. Dado lo anterior, se justifica el estudio y desarrollo realizado al proponer un sistema de lógica difusa donde las variables de entrada serán: drenaje y CE y la salida es fertirriego con la unidad de medida en litros (l).

Como ya se explicó con detalle en el capítulo 2, el drenaje de un cultivo tiene dos funciones básicas: no permitir la acumulación de sal en el sustrato, al remover los nutrientes acumulados excesivos; y restablecer la concentración de nutrientes en el sustrato. El drenaje también puede usarse para determinar la humedad del sustrato en el cultivo hidropónico. El exceso de drenaje implica pérdidas de agua y fertilizantes que tienen un impacto directo en el medio ambiente. Con bajos niveles de drenaje, en un ecosistema tropical como el de Costa Rica, existe el riesgo de salinización del sustrato, y teniendo en cuenta que las plantas absorben agua a una velocidad mayor que los nutrientes, esto puede causar excesiva acumulación de sal en el sustrato. Algunos autores, como Soto-Bravo, han establecido criterios prácticos sobre el riego tomando en consideración el porcentaje de drenaje (*PD* en adelante), y usándolo para la toma de decisiones sobre riego deficiente o excesivo. La operación para determinar *PD* está dada por

$$PD = \left(\frac{\text{Sol. Drenada}(L/m^2)}{\text{Sol. Aplicada}(L/m^2)} \right) * 100 \quad (4.1)$$

donde *Sol. Drenada* corresponde a la cantidad de la solución drenada (recogida) y *Sol. Aplicada* a la cantidad de agua aplicada con fertilizantes o nutrientes agregados.

El valor de la PD depende generalmente de la calidad del agua utilizada para el riego. Conforme incrementa la salinidad del agua, el requerimiento de drenaje sube hasta un 30-40 %. A la inversa, si la calidad del agua es buena, los productores tienen la posibilidad de reducir el PD hasta 10 o 15 %, lo que se traduce en menores costos de producción. Otra ventaja de la recolección de drenaje es que esta agua puede ser reutilizarse como riego, ahorrando también en las soluciones nutritivas aplicadas [36].

En una producción hortícola típica, se recogen a mano los datos de mediciones de drenaje, pH y conductividad. Este proceso se mejora mediante el uso de un sistema de toma datos que envíe automáticamente los mismos a la “nube” (ver figura 4.1), pero esto puede significar por otro lado que, en lugar de tabular los datos a mano, los investigadores y los productores terminan con una cantidad excesiva de datos sin procesar en sus computadoras, datos que requieren análisis para obtener información útil.

Dentro de la línea punteada azul (ver figura 4.1) se han incluido los elementos borrosos, el primer bloque contempla el conjunto de reglas lingüísticas (*Linguistic Fuzzy Sets*) definidas para las entradas de drenaje y CE, así como para la salida de fertirriego. En el bloque de controlador difuso (*Fuzzy Logic Controller*) ingresan las reglas con sus respectivos valores actuales, luego se determina un número escalar (*Scalar value*) asociado a la regla lingüística que será utilizado para la toma de decisión de fertirriego. Por último, el resultado del controlador es enviado a Internet.

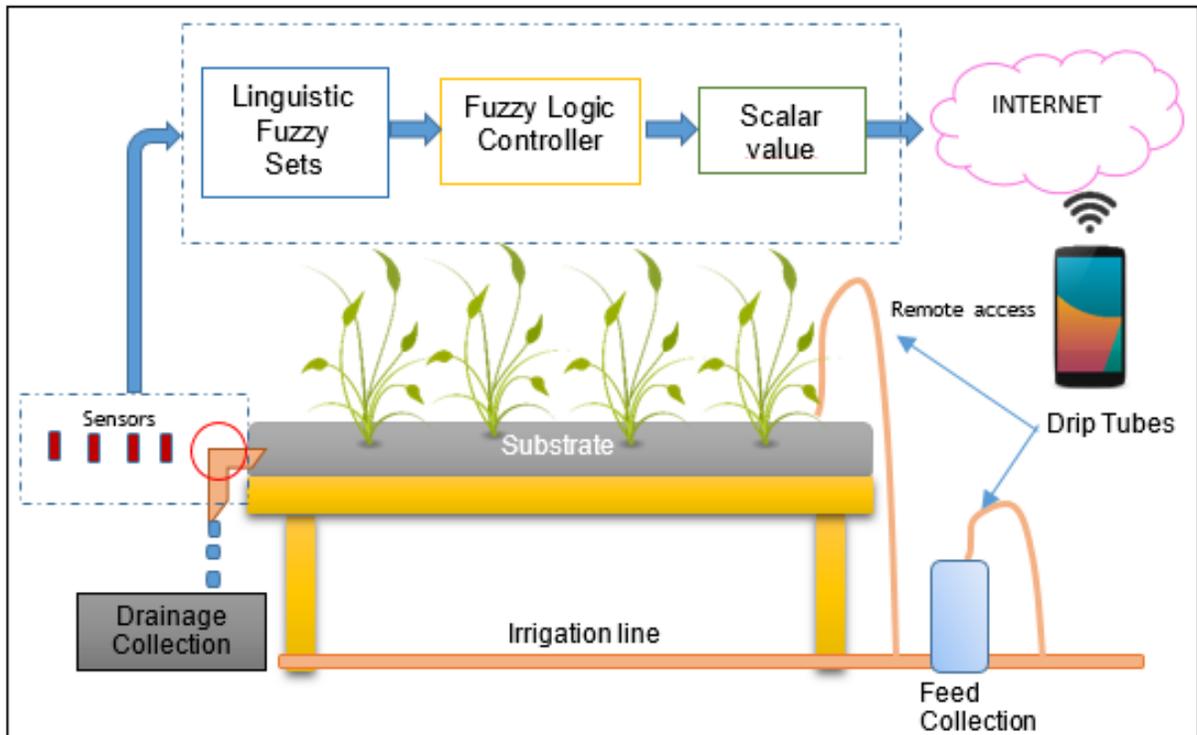


Figura 4.1: Representación esquemática desarrollada para un proceso de producción hortícola en ambiente protegido. Se muestran los puntos usuales de recolección de drenaje y de fertirriego. Se muestra también el bloque del conjunto de reglas borrosas, el controlador difuso y el resultado numérico definido por un valor escalar [5].

4.2 Metodología e implementación

En [10, 31] se ha mostrado una unidad de recolección de datos factible, con su respectiva descripción de hardware y software. Este sistema lleva a cabo una medición constante de variables ambientales (como la temperatura ambiente, la humedad y la intensidad luminosa), así como la humedad del sustrato, el drenaje, el pH y la conductividad. Los datos se cargan en la nube, con la correspondiente accesibilidad casi instantánea a los mismos por parte de los investigadores o productores. El rendimiento del sistema ha sido probado en un invernadero dedicado al cultivo de productos hortícolas en sustrato de fibra de coco, donde los datos adquiridos de variables ambientales, condiciones de humedad del sustrato y recolección de drenaje y medición de CE se envían a través de Internet para ser procesados usando técnicas de fusión de datos y criterios basados en expertos (ver Capítulo 5 para detalles del sistema de Internet de las Cosas).

Por lo tanto, se dispone de medios de información para la toma de decisiones sobre cómo minimizar la frecuencia del proceso de riego, la cantidad requerida de agua, nutrientes y fertilizantes durante todo el período de crecimiento y producción de un cultivo; esto, por supuesto, si los datos se manejan con modelos que son capaces de fusionar con la experiencia humana. Aquí es donde el uso de FLM es utilizado para traducir las reglas léxicas del sentido común en valores numéricos, considerando los datos del drenaje y CE es posible proporcionar a investigadores y productores una herramienta útil para planear eficientemente la programación del fertirriego.

Los dos principales pasos a seguir son: primero, definir qué variables lingüísticas estaban relacionadas con el proceso de riego; y segundo, establecer los conjuntos difusos necesarios con sus reglas difusas relacionadas.

4.2.1 Selección de los sistemas de inferencia fuzzy

Un sistema de inferencia difusa (*Fuzzy Inference System*, FIS por sus siglas en inglés) utiliza la teoría de conjuntos difusos para asignar las características de las entradas a las clases de resultados; tanto en el caso de la clasificación difusa. Hay dos tipos de FIS: Mamdani y Sugeno. Un FIS de Mamdani encuentra el centroide de un modelo bidimensional mientras que un Sugeno puede ser usado para modelar cualquier sistema de inferencia en el cual las funciones de pertenencia de salida sean lineales o constantes. En este caso, se seleccionó un controlador Mamdani FIS debido a la naturaleza binaria del proceso considerado (véase [56, 57], para otros ejemplos de controladores de Mamdani).

Ahora bien, dado que un conjunto difuso (FS, por sus siglas en inglés para Fuzzy Sets) es un conjunto que contiene elementos que tienen diferentes grados de pertenencia, permite la descripción de conceptos con cierta ambigüedad. Un FS admite la posibilidad de pertenencia parcial en el mismo y el grado en que un objeto pertenece a un FS se denotará por un valor de pertenencia entre 0 y 1. En resumen, las entradas, salidas y definición de reglas se establecerán con el fin de modelar un sistema de inferencia completo. En

la Tabla 4.1 hay una descripción detallada de todos los nombres y rangos considerados en el modelo propuesto para dos variables de entrada —drenaje— y —CE—, y una salida —fertirriego—. Para las variables drenaje y fertirriego se ha utilizado una función triangular y para la CE un trapecoide; el tipo de función triangular para cada conjunto difuso considera los centroides de los triángulo como punto de toma de decisiones con respecto al drenaje y el fertirriego. En el caso particular de la CE no se han establecido rangos que son representados por el trapecoide.

4.2.2 Criterios para la definición de términos lingüísticos

En los sistemas de cultivo en sustrato la solución nutritiva se aporta en exceso por la superior, mediante goteros o microaspersores, o por la parte inferior del sustrato para que suba por capilaridad [6]. Los excesos de aporte de los nutrientes y agua aportados mediante la fertirrigación son evacuados en forma de drenaje por la parte inferior.

Antes de establecer los términos lingüísticos que permitirán definir los criterios de fertirriego es necesario conocer las características físicas de relevancia de un sustrato, las cuales son: la porosidad, la retención y disponibilidad de agua, y contenido de aire.

Según Abad et. al [58], el volumen total del sustrato que no está ocupado por partículas orgánicas ni minerales es establecido por la porosidad total (o espacio poroso total) y además, define que el nivel óptimo de volumen en el sustrato debe ser superior del 85%.

En relación al agua disponible o agua útil en cultivos en sustrato, se deben conocer las características físicas e hidráulicas, dado que se encuentra en unos rangos muy limitados de tensión mátrica. Entiéndase tensión mátrica como la tensión de agua del suelo (o potencial mátrico) el cual tiene que ser superado por la planta para mover el agua a su sistema de raíces. Diferentes tipos de suelos tendrán tensiones diferentes, incluso en la misma medición volumétrica, haciendo que la información volumétrica en relación con condiciones locales requieran a menudo calibración del sitio para el equipo de lectura.

Dado lo anterior, se espera poder sustituir la medición de tensión mátrica por el controlador de lógica de difusa que tome en consideración las variables lingüísticas establecidas para el drenaje y la conductividad eléctrica.

En la figura 4.2 se presenta la curva de retención de agua en un sustrato considerado ideal. Los valores de tensión mátrica de 1,5 y 10 centibares definen los contenidos de agua fácilmente disponible (AFD, entre 1 y 5 cb). Específicamente de la característica física establecida para la disponibilidad de agua, se determinan los términos lingüísticos para la disponibilidad de agua. Se propone el uso de las siguientes abreviaturas para los términos lingüísticos AFD (agua fácilmente disponible), AMFD (agua muy fácilmente disponible), ADF (agua difícilmente disponible) y AMDD (agua muy difícilmente disponible).

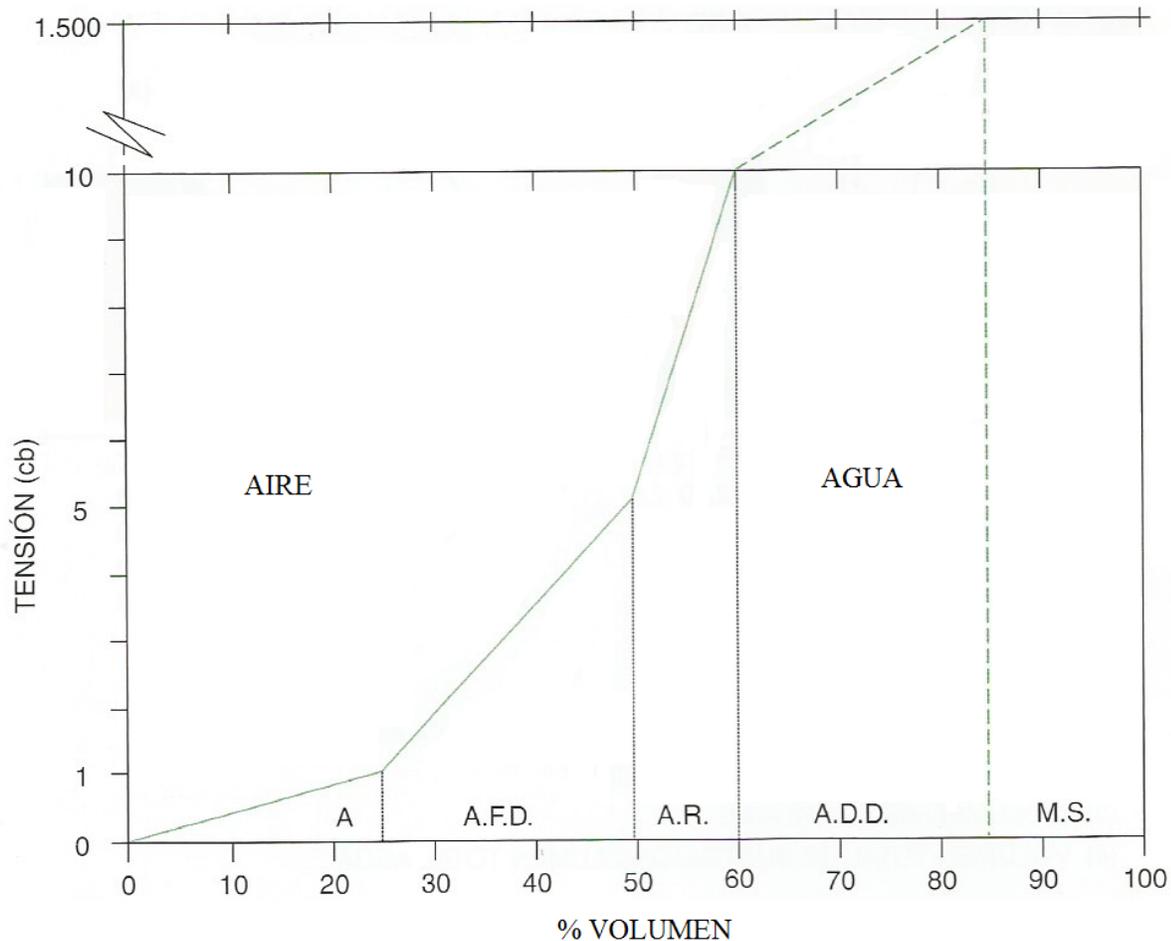


Figura 4.2: Curvas de retención de agua en un sustrato ideal. A: % de aire (25%). A.F.D.: % de agua fácilmente disponible. A.R.: % agua de reserva. A.D.D.: % de agua difícilmente disponible. M.S.: % ocupado por material sólido (15%). [6]. A partir de esta imagen es posible establecer los rangos, en porcentaje de volumen, en los cuales el agua estará fácilmente (AFD) o difícilmente disponible (ADD) en los cultivos tomando como referencia un sustrato ideal.

4.2.3 Pertenencia, cobertura y reglas difusas

Los sistemas difusos, también conocidos como borrosos, son sistemas expertos definidos en términos de conjuntos borrosos. Como tal, se dispone de reglas cuyas variables se valorarán según su grado de pertenencia a los conjuntos usados en la definición de sus entradas, a la salida también se le debe definir su grado de pertenencia en su respectiva variable borrosa. Dependiendo del grado de pertenencia de la variable (drenaje, CE, fertirriego u otra) para cada uno de los conjuntos difusos establecidos se dispondrá de la regla que se activará en un mayor o menor grado [59].

Una cobertura (*hedge*) sirve como un modificador de los valores difusos. Hay cinco tipos diferentes de coberturas: concentración (muy), dilatación (algo), intensificación del contraste (extremadamente), vago (raramente) y probabilístico (probable). En el modelo

presentado se utilizó la cobertura de concentración *muy* para establecer una diferencia en cuanto a la disponibilidad de agua. La cobertura de concentración se define aquí, en términos generales, como

$$\mu_{A'}(x) = \mu_A(x)^p, p > 1 \quad (4.2)$$

donde A' es la concentración del conjunto A .

La cobertura *muy* puede implementarse usando una función cuadrada, es decir, para

- *Agua Muy Difícilmente* Disponible - AMDD y
- *Agua Difícilmente* Disponible - ADD,

esto puede representarse como

$$\mu_{AMDD}(x) = \mu_{ADD}(x)^2 \quad (4.3)$$

Ahora, en la vida real, hay reglas sobre razonamiento y posibles consecuencias. Los antecedentes de una regla difusa son proposiciones que contienen variables lingüísticas. En general, las reglas difusas se expresan como en

$$\text{si } A \text{ es } a \text{ y } B \text{ es } b \text{ entonces } C \text{ es } c \quad (4.4)$$

donde A y B son conjuntos difusos con un universo de discurso X_1 , y C es un conjunto difuso con un universo de discurso X_2 . Los componentes de razonamiento difusos se separan en fuzzificación (definición de entradas, salidas y reglas difusas asociadas), inferencia (serie de valores de salida difusos) y defuzzificación (convirtiendo la salida de las reglas difusas en un valor escalar o no difuso). Las reglas *si - entonces* describen situaciones que pueden ocurrir, con una acción correspondiente que debe ejecutarse. Es posible que más de una situación, tal como se describe en las reglas de *si - entonces*, sean simultáneas activas, con diferentes acciones.

En la tabla 4.1 se ha definido el conjuntos de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua y conductividad eléctrica.

4.2.4 Implementación del controlador de lógica difusa

En este trabajo, se siguieron todos los pasos metodológicos para definir un controlador de tipo Mamdani. La tabla 4.1 muestra la definición de las funciones de pertenencia para cada variable de entrada (en este caso “drenaje” y “CE”), con las reglas difusas definidas y las salidas correspondientes. El controlador resultante proporciona ahora un

Tabla 4.1: Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua y conductividad eléctrica [12, 13]

Drenaje (ml) Entrada	Conductividad Eléctrica CE- (mS/cm) Entrada	Fertirriego (l) Salida	Reglas Difusas
Agua muy difícilmente disponible (AMDD)	CE-Baja	Fertirriego Abundante	<i>Si el Drenaje es AMDD y Conductividad es CE-Baja Entonces Fertirriego es Fertirriego Abundante</i>
Agua difícilmente disponible (ADD)	CE-Buena	Fertirriego Normal	<i>Si el Drenaje es ADD y Conductividad es CE-Buena Entonces Fertirriego es Fertirriego Normal</i>
Agua fácilmente disponible (AFD)	CE-Alta	Fertirriego Poco	<i>Si el Drenaje es AFD y Conductividad es CE-Buena Entonces Fertirriego es Fertirriego Poco</i>
Agua muy fácilmente disponible (AMFD)		No Fertirriego	<i>Si el Drenaje es AMFD y Conductividad es CE-Alta Entonces Fertirriego es No Fertirriego</i>

valor escalar que asigna a un valor numérico las variables lingüísticas relacionadas con la toma de decisiones de planificación de riego.

Para cumplir con la metodología se siguieron siete pasos:

1. Identificar y nombrar variables lingüísticas de entrada y definir sus rangos numéricos.
2. Identificar y nombrar las variables lingüísticas de salida y definir sus rangos numéricos.
3. Definir un conjunto de funciones de pertenencia fuzzy a cada una de las variables de entrada, así como las variables de salida.
4. Construir la base de reglas que representa la estrategia de control.
5. Realizar la fuzificación de los valores de entrada.
6. Realizar la inferencia para determinar la función de activación de las reglas previamente definidas.
7. Defuzificación, utilizar el centroide con mayor peso o gravedad, para determinar la acción correspondiente a ejecutar.

Para cumplir con el paso uno de la metodología se identificaron dos variables de entrada: Drenaje y Conductividad Eléctrica. Para el drenaje se establecieron formas triangulares para hacer énfasis en los puntos de medición máximos, situación que queda explícita en la figura 4.3.

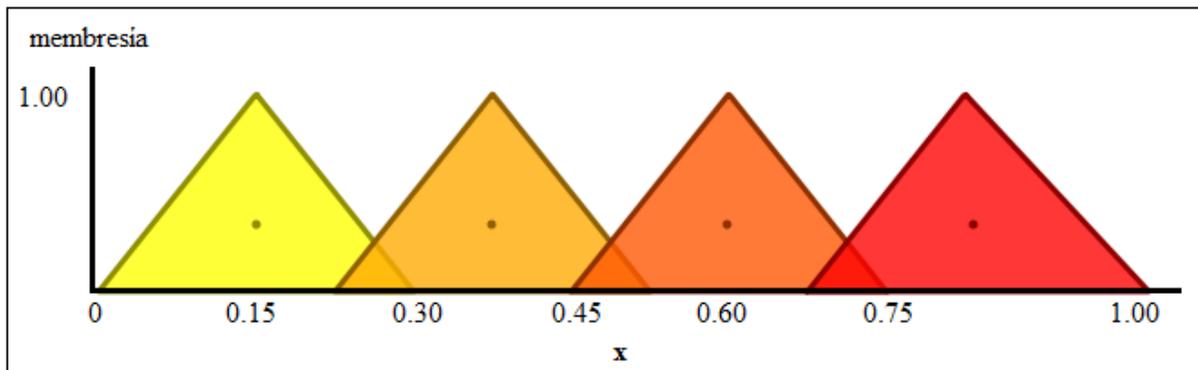


Figura 4.3: Función de pertenencia de la entrada "Drenaje", se evidencia el establecimiento de formas triangulares para las condiciones de disponibilidad de agua

La membresía de la CE fue diseñada partir de formas trapezoidales de manera tal que se evidencia gráficamente los rangos y no puntos máximos como los requeridos en la medición de drenaje. En la figura 4.4 se establecen los valores de pertenencia (membresía) para la entrada de CE. Ambas entradas, drenaje y conductividad son definidas como "x".

Para cumplir con el paso dos de la metodología se estableció una variable de salida: Fertirriego. Los rangos de la variables fueron definidos mediante formas triangulares y la membresía se muestra en la figura 4.5, la salida se identifica con la letra "y".

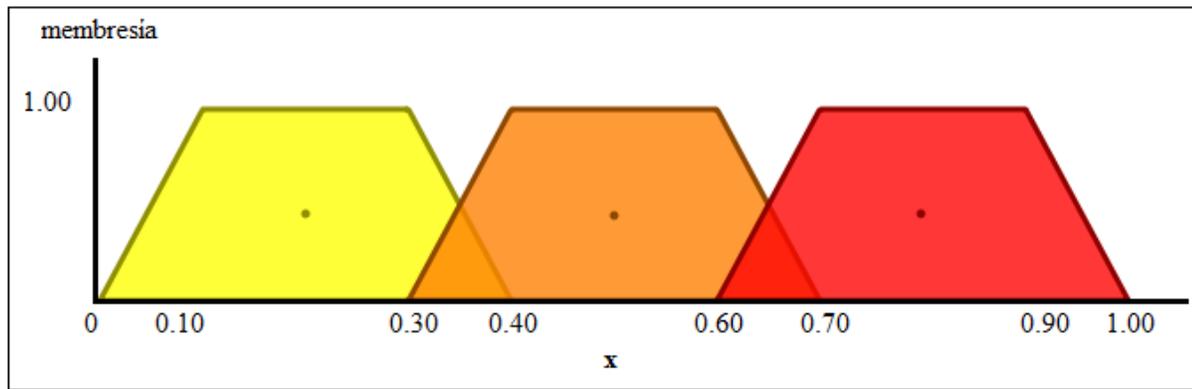


Figura 4.4: Función de pertenencia de la entrada “Conductividad”, se evidencia el establecimiento de formas trapezoidales para las condiciones de CE.

El controlador resultante proporcionará a la salida uno o varios datos escalares que dependen de las entradas y reglas difusas. En el caso particular del ejemplo presentado se obtiene a la salida 0,367 de poco riego y 0,133 de riego normal. Mediante el criterio de experto lo que se busca es tomar una decisión que permita que el cultivo siga desarrollándose apropiadamente y que además sea posible ahorrar agua y fertilizantes al disminuir la cantidad de fertirriego programado. Ante esta premisa, la decisión es aplicar un 13,3 % del fertirriego normal porque el agua está fácilmente disponible y la conductividad es buena.

En el apéndice B, específicamente en la tabla B.1, se ha validado el cumplimiento del criterio de experto en los puntos críticos del controlador borroso, así como en otros puntos de relevancia en la toma de decisiones. La cantidad de escenarios seleccionados para las pruebas son suficientemente representativos para la validación del controlador [12].

Es importante resaltar que el valor o valores escalares de salida, serán el punto de partida para la toma de decisiones de planificación de fertirriego. Ahora, dado que se tiene un dato

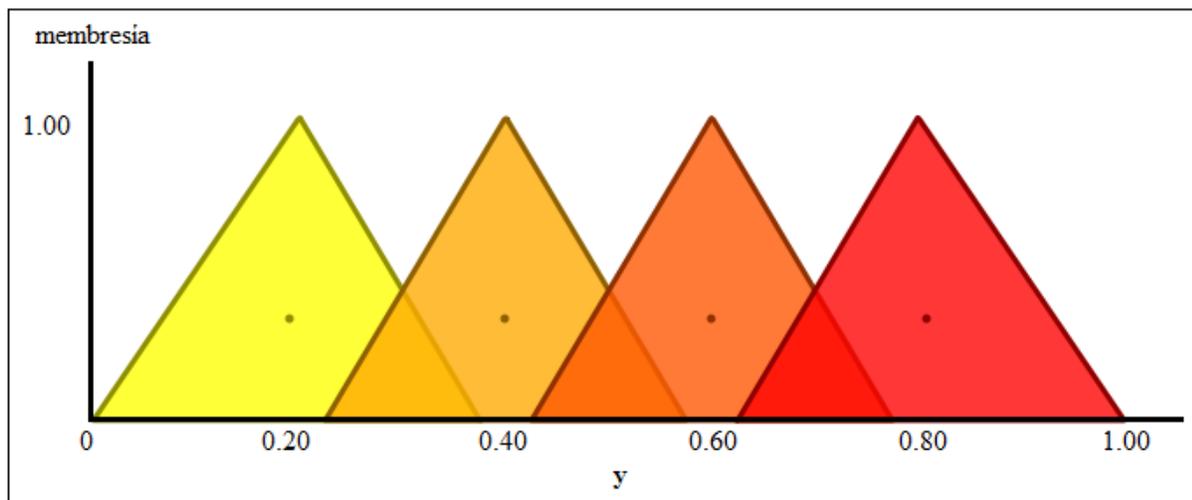


Figura 4.5: Función de pertenencia de la salida “Fertirriego”, se evidencia el establecimiento de formas triangulares para las condiciones de fertirriego.

numérico, el problema es matemáticamente manejable. En la sección 4.3 se muestran los resultados obtenidos al evaluar el controlador mediante el software QtFuzzyLite versión 6.

4.3 Resultados y discusión

La herramienta de software QtFuzzyLite se utilizó para construir y probar el FIS. La figura 4.6 muestra cuatro funciones triangulares que representan conjuntos difusos de entrada para la pertenencia a disponibilidad de agua y tres conjuntos trapezoidales para la conductividad eléctrica (como se define en la tabla 4.1). Como ejemplo, la función de entrada de drenaje tiene un valor de 0,133 para ADD y 0,367 para AFD, como se expresa por

$$\mu_{Drenaje}(x) = 0,000_{AMDD} + 0,133_{ADD} + 0,167_{AFD} + 0,000_{AMFD} \quad (4.5)$$

La función de entrada de CE tiene un valor de 1,000 para Conductividad Buena y 0,0000 para Conductividad Baja y Conductividad Alta, según queda expresada por

$$\mu_{Conductividad}(x) = 0,000_{ConductividadBaja} + 1,000_{ConductividadBuena} + 0,000_{ConductividadAlta} \quad (4.6)$$

Para determinar la mejor acción a tomar sobre el proceso de riego, se seleccionó el método de inferencia max-min y se determinó la regla con la mayor fuerza de disparo para inferir una acción de un conjunto de situaciones activadas. El centroide del área bajo esa función se calcula y la coordenada horizontal de ese centroide se toma como la salida del controlador de Mamdani. Para el ejemplo, la fuerza de disparo más grande es 0,333, que corresponde a la función de pertenencia RiegoPoco. La figura 4.7 ilustra el cálculo de la salida para las entradas dadas en la figura 4.6, para lo cual la función de salida queda expresada por

$$\mu_{Fertirriego}(y) = 0,367_{RiegoPoco} + 0,133_{RiegoNormal} \quad (4.7)$$

donde todas las pertenencias de cero del conjunto difuso no son representadas.

Con el fin de validar los resultados obtenidos por el controlador, se compararon las decisiones tomadas con respecto a las reglas difusas establecidas. Fue posible evidenciar que la salida o toma de decisión coincide con la acción que debe ser tomada en caso de que la disponibilidad de agua sea AFD y la Conductividad Buena, en la ecuación de salida el Fertirriego es Poco con un valor escalar de “0,367” y Normal con un valor de “0,133” dato que implicaría un ahorro de agua y fertilizantes del 97 %, si se opta por realizar un fertirriego del 13 % del normal programado de acuerdo al estado de desarrollo fenológico del cultivo.

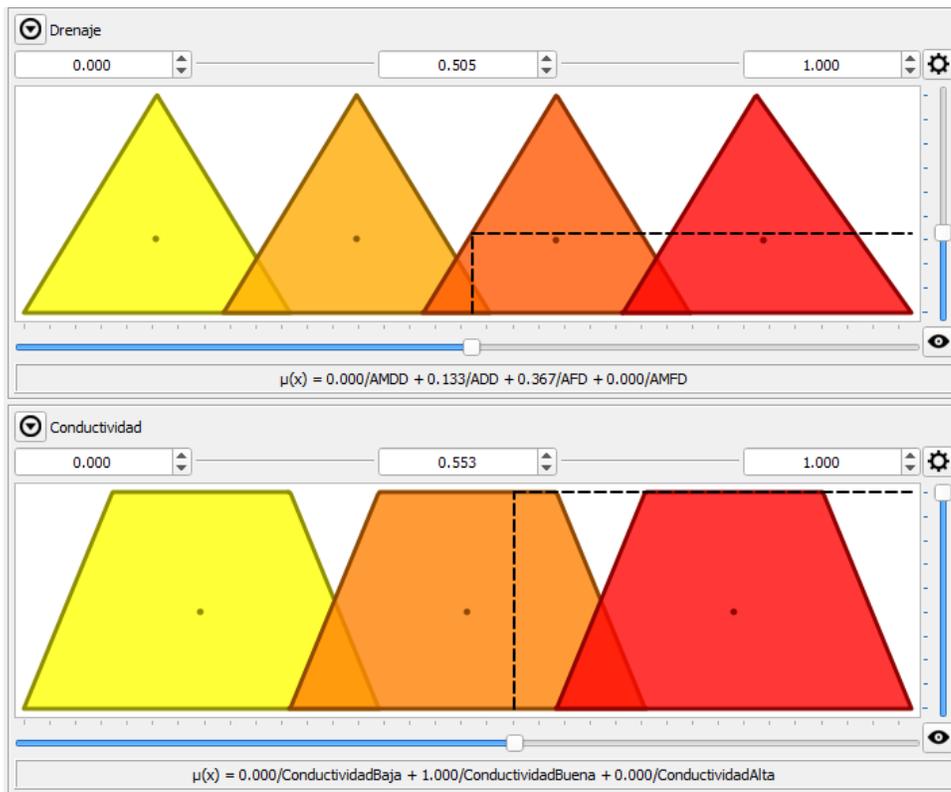


Figura 4.6: Función de pertenencia para la Disponibilidad de Agua (DA) y Conductividad Eléctrica (CE). Cuatro variables lingüísticas fueron definidas para la DA y tres para la CE, se han establecido funciones triangulares para DA y trapezoidales para cada conjunto difuso de CE (imagen generada con el software QtFuzzyLite).

Por medio del software es posible simular distintas condiciones del cultivo y evaluar, con respecto a al criterio de experto, si la decisión que tomaría el controlador es similar a la que ejecutaría un investigador o productor con experiencia sobre el tema. En la figura 4.8 se muestran las entradas, funciones que describen las entradas y la salida con su respectiva ecuación descriptiva. Se debe destacar que en la parte inferior de cada entrada existe un deslizador lineal para ajustar la función que se desea evaluar.

Los valores de entrada de drenaje y conductividad son registrados automáticamente por medio de los dispositivos detallados en los capítulos de medición de drenaje y el sensor de conductividad eléctrica para medios acuosos altamente salinos. Los sistemas desarrollados también permiten guardar información de variables ambientales, tales como humedad relativa y temperatura dentro del invernadero, pero en la práctica los investigadores y productores toman decisiones a partir del drenaje y conductividad únicamente.

El proceso de fertirriego normal implica que se seguirán las tablas de nutrientes según el tipo de cultivo y la edad o desarrollo fenológico, por medio del controlador se busca ahorrar en agua y nutrientes sin que esto afecte el crecimiento del cultivo.

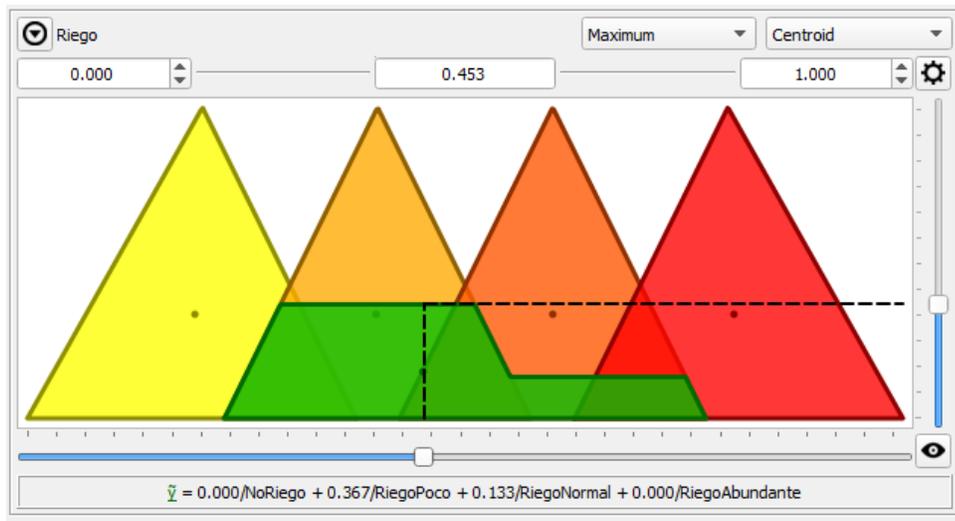


Figura 4.7: Ejemplo de la función de pertenencia de Fertirriego. Valor de salida determinado considerando las entradas dadas en la figura 4.6, donde una función triangular es establecida para el conjunto difuso de Fertirriego (imagen generada con el software QtFuzzyLite).

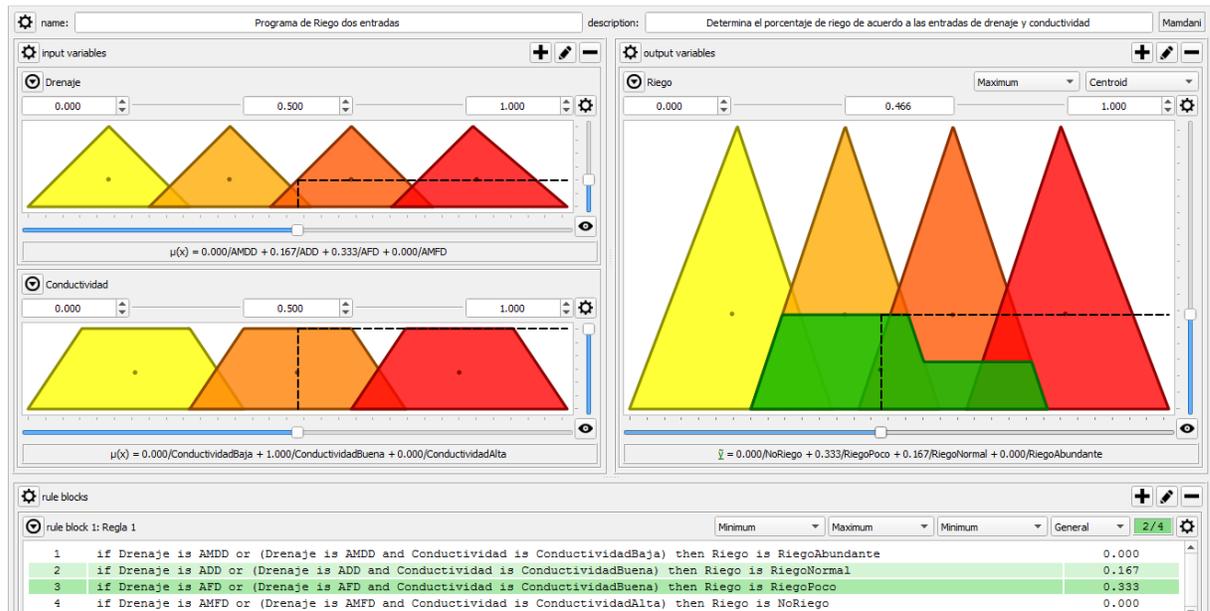


Figura 4.8: Imagen de entradas y salidas por medio del software FuzzyQlite - se evidencia condición de salida en el Fertirriego dadas las mediciones de drenaje y conductividad

4.3.1 Inclusión de la variable de entrada pH en el controlador de lógica difusa

En la figura 4.9 se hace uso del controlador de lógica difusa incorporando como tercera variable de entrada el pH, la herramienta utilizada permite ingresar nuevas variables de interés para la toma de decisiones. Se evidencia gráficamente que para un drenaje que indica AMDD (Agua muy difícilmente disponible), CE buena y pH ideal, la salida de riego establecida es riego normal.

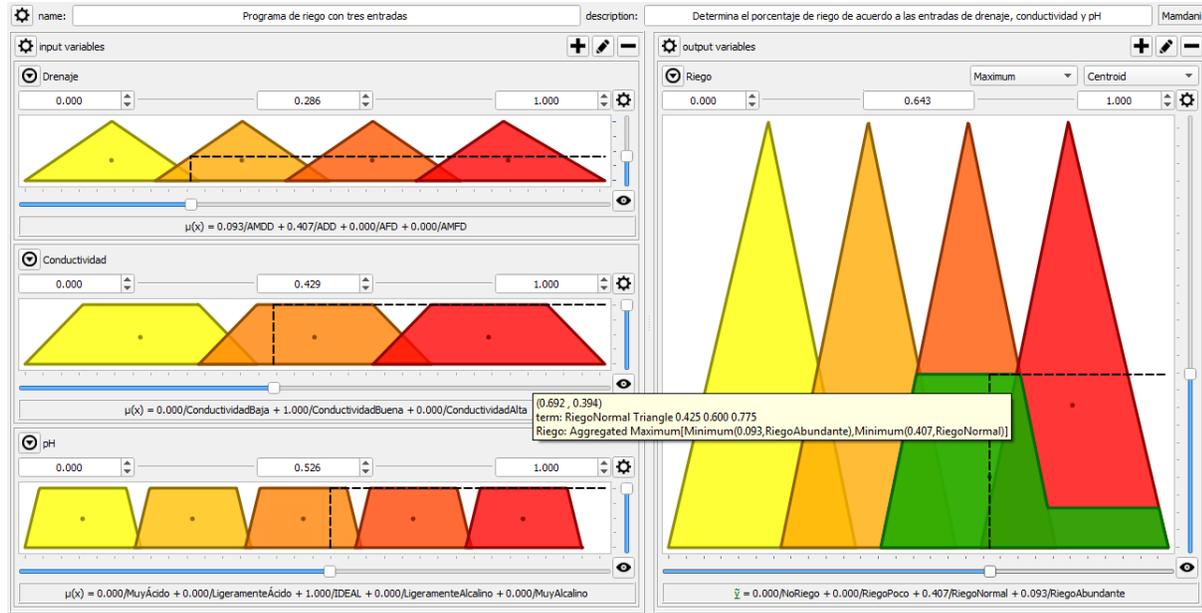


Figura 4.9: Toma de decisiones de riego con el controlador de lógica difusa evaluando tres variables de entrada: drenaje, conductividad y pH. Se evidencia en el cuadro de salida los valores propuestos para el riego [7].

En la tabla 4.2 se ejemplifica la toma de decisiones agregando como tercer variable de entrada el pH. Cabe destacar que para la definición de los rangos de decisión se tomó en consideración el criterio de experto [13], lo que dio lugar al establecimiento de los conceptos lingüísticos de pH: muy ácido, ligeramente ácido, ideal, ligeramente alcalino y muy alcalino.

En la salida de fertirriego se evidencia el cumplimiento de las reglas difusas definidas con las tres variables de entrada: drenaje, CE y pH. En el apéndice B se presentan los resultados obtenidos considerando pruebas en los puntos críticos del controlador, se logra evidenciar el cumplimiento del criterio de experto.

La conectividad entre el sistema de toma de decisiones y la plataforma IdC se puede establecer mediante la programación en Matlab existente en ThingSpeak [8]. A continuación, en el capítulo 5, se presenta el desarrollo que integra la lógica difusa y la aplicación de IdC en un sistema autónomo de toma de decisiones relacionadas con fertirriego en cultivos hidropónicos en ambientes protegidos.

Tabla 4.2: Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua, CE y pH [12, 13]

Drenaje (ml) Entrada	CE (mS/cm) Entrada	pH Entrada	Fertirriego (l) Salida	Reglas Difusas
Agua muy difícilmente disponible (AMDD)	CE-Baja	Muy ácido	Fertirriego Abundante	Si el Drenaje es AMDD y (Conductividad es CE-Baja o pH es Muy ácido) Entonces Fertirriego es Mucho Fertirriego
Agua difícilmente disponible (ADD)	CE-Buena	Ligeramente ácido	Fertirriego Normal	Si el Drenaje es ADD y (Conductividad es CE-Buena o pH es Ligeramente ácido) Entonces Fertirriego es Fertirriego Normal
Agua fácilmente disponible (AFD)	CE-Alta	Ideal	Fertirriego Poco	Si el Drenaje es AFD y (Conductividad es CE-Buena o pH es Ideal) Entonces Fertirriego es Poco Fertirriego
Agua muy fácilmente disponible (AMFD)		Ligeramente alcalino	No Fertirriego	Si el Drenaje es AMFD y (Conductividad es CE-Alta o pH es Ligeramente alcalino) Entonces Fertirriego es No Fertirriego
		Muy alcalino		No Fertirriego

4.4 Conclusiones

Se ha mostrado el desarrollo de un sistema de inferencia difusa para el control del fertirriego, a partir de las entradas de drenaje y conductividad; se utilizaron los niveles de concentraciones "muy" para establecer reglas difusas y determinar un valor escalar aproximado para representar la acción a tomar (en este caso establecer cuánto riego debe ser aplicado). Se seleccionó un controlador fuzzy de Mamdani con un método máximo y salida centroide. Para una fuerza de disparo de 0,133, por ejemplo, dada por el método de inferencia y usando el controlador de centroide de Mamdani propuesto, la acción debe ser 0,133 del punto de referencia de riego normal, lo que se traduce numéricamente en un 13% del riego establecido.

Se ha validado el sistema experto por medio del cumplimiento de las reglas difusas establecidas en el controlador, cada vez que una combinación de las condiciones de conductividad eléctrica y de drenaje coinciden con los términos lingüísticos establecidos para el problema de toma de decisiones relacionadas con el fertirriego, se valida el criterio de experto que dió lugar al conjunto y definición de reglas.

Además, se ha desarrollado un sistema experto que actualmente utiliza hasta tres (3) variables para la toma de decisiones sobre fertirriego, pero para ampliar dicho conjunto de entradas solo se deben incorporar nuevas reglas asociadas a las mismas. Por ejemplo, es posible incluir nuevas variables de interés como lo son: tensión de sustrato, contenido de nitratos, calcio, potasio, sulfatos, conductividad eléctrica y temperatura en el sustrato, entre otros.

4.5 Recomendaciones

En el futuro, los modelos fuzzy más eficientes de la toma de decisiones de programación de riego se pueden implementar considerando variables tales como: temperatura y humedad del sustrato, temperatura y humedad ambiental dentro y fuera del invernadero; todas estas variables pueden ser priorizadas para ser agregadas a las reglas de inferencia necesarias para anticipar las necesidades de agua de las plantas durante su proceso de crecimiento, maximizando así su producción y minimizando el uso de agua, nutrientes y fertilizantes. Para ello, la evaluación del controlador con una producción de cultivos en curso es obligatoria, donde también se establece un grupo de control de plantas para proporcionar una prueba más rigurosa del controlador propuesto.

Capítulo 5

Aplicaciones de Internet de las Cosas

A partir del modelo del controlador de lógica difusa (implementado en el capítulo 4) fue posible establecer y validar las variables lingüísticas asociadas a la toma de decisiones de fertirriego. En este capítulo se tiene el objetivo de utilizar IdC para que los investigadores puedan tener acceso, en cualquier momento, a los datos mediante el uso de la herramienta tecnológica que toma en consideración criterio de experto, de manera tal que puedan mejorar o mantener el rendimiento de sus cultivos por medio de un aporte óptimo de nutrientes. Además, se analizaron dos sistemas concretos en los cuales se utilizó IdC, el primero es orientado al desarrollo de un controlador con lógica difusa para la toma de decisiones de fertirriego en un cultivo hortícola bajo la modalidad de ambiente protegido. El segundo se centra en la aplicación de IdC en la medición de variables relacionadas con el proceso de crecimiento de las microalgas, específicamente *Chorella vulgaris* cultivada en un fotobioreactor.

5.1 Introducción

Costa Rica es conocido a nivel mundial por el cuidado del ambiente y también por el reto que se propuso con miras a ser un país carbono neutral (C-neutral) en el año 2021 [60]. En el marco de la conferencia internacional Internet de las Cosas para la Comunidad Global (*Internet of Things for the Global Community* - IoTGC, por sus siglas en inglés), llevado a cabo en julio del 2017, se presentó una ponencia a raíz del artículo titulado “*IoT applications: On the path of Costa Rica’s commitment to becoming carbon-neutral*” (Aplicaciones de IdC: en la ruta del compromiso de Costa Rica de convertirse en carbono neutral) [21]. En este artículo se detallan dos aplicaciones que hacen uso de IdC, el primero es orientado a la horticultura en ambientes protegidos y el segundo al cultivo de microalgas.

Además, en la conferencia internacional Energía y sostenibilidad en pequeñas economías emergentes (*Energy and Sustainability in Small Developing Economies* - ES2DE, por sus siglas en inglés), se presentó el artículo titulado “*Characterization of biomass pellets from*

Chlorella vulgaris microalgal production using industrial wastewater” - Caracterización de pellets de biomasa de la producción de microalgas de *Chlorella vulgaris* utilizando aguas residuales industriales, en el cual se detalla sobre el uso de microalgas para la producción de pellets a partir de aguas residuales de la industria [22], igualmente con adquisición de datos por medio de IdC.

El objetivo principal del presente capítulo es mostrar la integración de los capítulos 2, 3 y 4, en una solución de IdC orientada a la horticultura. Como ejemplo adicional sobre dicha integración, y su potencial aplicación en múltiples áreas, también se documenta una aplicación IdC en cultivos migroalgales.

5.2 Internet de las Cosas en la horticultura

Tal como se detalló en el capítulo 2 (relacionado con la medición de drenaje), y como ratifican Valverde y Villalobos en [61], para su desarrollo y producción, las plantas necesitan, entre otros factores, la presencia de agua, dióxido de carbono, oxígeno, luz, calor, así como macronutrientes y micronutrientes. La cantidad de macronutrientes depende de la especie vegetal, de la etapa fenológica del cultivo y de la producción esperada. Estos macronutrientes pueden ser aportados por el suelo, el agua y el fertilizante. Para el desarrollo del sistema que aquí se documenta, el sustrato utilizado fue fibra de coco, por lo tanto se hizo énfasis en comprender las características químicas de la fibra de coco (visto en el capítulo 2), sobre el contenido químico del agua y las sales nutritivas que se añadirán y que brindarán los micronutrientes y macronutrientes requeridos, pues ello impactaría en las necesidades finales de operación del sistema a integrar.

Según Valverde Conejo [33], la eliminación del exceso de aguas, en los cultivos agrícolas, constituye una actividad de gran significado porque puede representar la diferencia entre una cosecha exitosa o un fracaso agrícola. En cuanto a la disponibilidad de agua en los cultivos, Soto-Bravo [36] también hace hincapie en la relevancia de la medición de drenaje. De esto se deriva la importancia de medir la CE en medios acuosos como el drenaje, analizado en el capítulo 3, pues es un valor de referencia sobre la cantidad de sales nutritivas que han consumido las plantas. Además, cuando los cultivos se encuentran en ambientes protegidos y se utilizan sustratos, la toma de decisiones relacionadas con el fertirriego son críticas porque el medio de cultivo o sustrato, por si solo, no contiene nutrientes (razón que, como ya se explicó, motivó el desarrollo ya expuesto en el capítulo 4 de un controlador de lógica difusa). La meta es ofrecer una herramienta que permita al productor final establecer un criterio sobre la cantidad óptima de fertirriego según las mediciones de CE y drenaje.

Para Castilla [6], el pH, normalmente, no se regula sino que se fija un valor concreto. Lo anterior implica la necesidad de un monitoreo constante, como parámetro adicional que puede indicar una potencial anomalía, pero que no ejercería influencia sobre el controlador del sistema completo. Es por ello que el controlador difuso diseñado incluye dicha variable

como un parámetro de observación, sin efecto de control, que se reserva nada más a las consignas de drenaje y CE.

El objetivo concreto del estudio se centró en evaluar el efecto del aumento de la temperatura en la cantidad de drenaje y conductividad del mismo, con la finalidad de estimar los efectos negativos en el desarrollo de los cultivos y coadyuvar en la identificación de herramientas y estrategias de modelado y predicción que sirvan de apoyo a los productores e investigadores para mitigar los efectos adversos del cambio climático. Es claro que el factor determinante es la gran presión existente sobre el consumo de agua, como variable crítica en el contexto mundial actual [62].

Investigadores y productores deben encontrar nuevas prácticas de producción alternativas de alimentos eficientes y científicamente probados bajo las condiciones ambientales imperantes de nuestro planeta, incluyendo nuevas directrices para el ahorro de agua, administración y algoritmos que permitan tomar decisiones en el momento adecuado. Dado lo anterior, los sistemas descritos en este documento servirán como herramienta fundamental y asequible, que proporciona no sólo información en tiempo real, sino que establece las bases para futuros sistemas expertos capaces de tomar decisiones eficientes con impacto financiero implícito.

En la figura 5.1 se muestra de nuevo el controlador difuso desarrollado, pero ahora con la utilización del pH como variable extra a monitorizar, sin influencia concreta sobre la toma de decisión (debe hacerse notar que ello no implica que el pH no pueda utilizarse en el sistema actual, por ejemplo, para la generación de una alarma que notifique algún problema en el cultivo). Es claro entonces que la herramienta utilizada permite ingresar nuevas variables de interés para la toma de decisiones. Se evidencia gráficamente que para un drenaje que indica AMDD (Agua muy difícilmente disponible), CE buena y pH ideal, la salida de riego establecida es riego normal.

En la plataforma IdC utilizada en el desarrollo es posible tener acceso a los datos almacenados en formato `csv` establecido por hojas de cálculo como Excel, situación que favorece la exportación de los datos para futuros análisis. En la figura 5.2 se muestran los datos adquiridos en campo (ambiente protegido con cultivo de chile): se realizaron dos mediciones por día durante siete días y se adquirieron de forma automatizada los datos de drenaje, CE y pH. Los valores almacenados tienen indicación de fecha, hora y datos de drenaje, conductividad y pH. Por ejemplo, en la línea dos de dicho archivo puede leerse: la fecha (07 de noviembre del 2016), hora (15:48:48), dato 1, drenaje (957), CE (187) y pH (6.35). Al interpretar los datos el investigador puede conocer el valor de las siguientes variables: drenaje de 0,957 l (litros), CE de 187 mS/cm y pH de 6,35.

Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 muestran los datos ya visualizados en la plataforma IdC de drenaje, conductividad y pH, respectivamente. Los datos, ya en línea, permitirán el monitoreo general de comportamiento por parte del productor, e incluso su análisis para momentos específicos, tal como ejemplifican todas las figuras. Es clara la versatilidad que ofrece el sistema para incorporar nuevas variables y establecer el tipo de gráficas que facilitarán la toma de decisiones relacionadas con el riego de los cultivos.

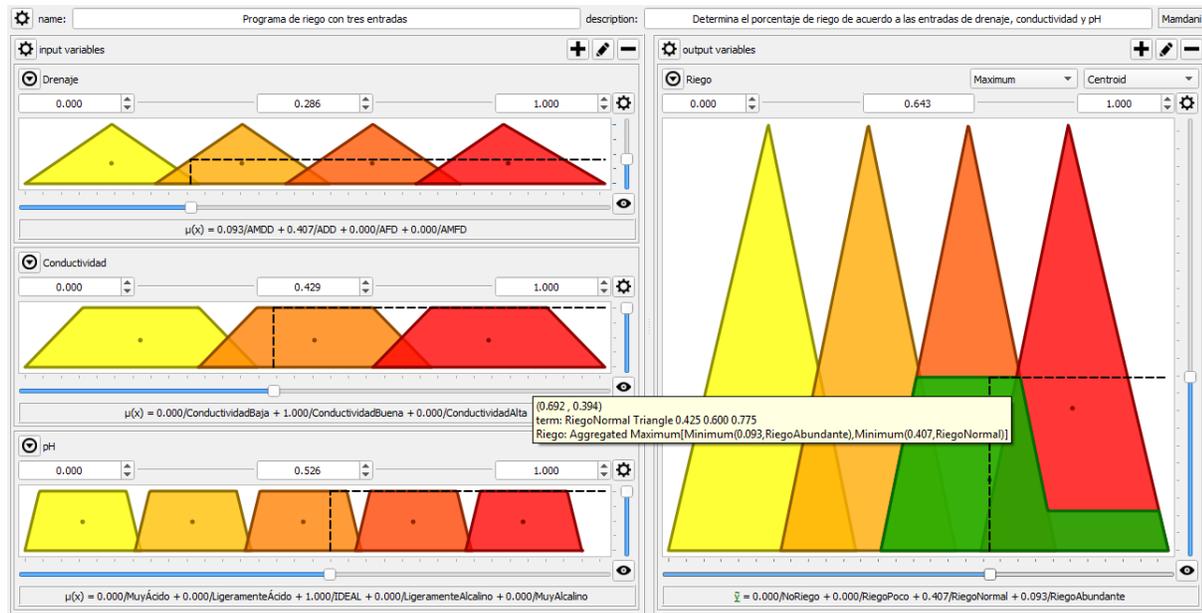


Figura 5.1: Toma de decisiones de riego con el controlador de lógica difusa evaluando tres variables de entrada: drenaje, conductividad y pH. Se evidencia en el cuadro de salida los valores propuestos para el riego [7].

	A
1	created_at,entry_id,field1,field2,field3
2	2016-11-07 15:48:48 UTC,1,957,187,6.35
3	2016-11-08 03:47:48 UTC,2,1047,190,6.45
4	2016-11-06 15:46:48 UTC,3,965,185,6.75
5	2016-11-07 03:45:48 UTC,4,1049,193,6.44
6	2016-11-05 15:44:48 UTC,5,982,182,6.72
7	2016-11-06 03:43:48 UTC,6,1045,172,6.45
8	2016-11-04 15:42:48 UTC,7,941,153,6.48
9	2016-11-05 03:41:48 UTC,8,1048,149,6.52
10	2016-11-03 15:40:48 UTC,9,952,190,6.74
11	2016-11-04 03:39:48 UTC,10,1057,153,6.45
12	2016-11-02 15:38:48 UTC,11,965,177,6.54
13	2016-11-03 03:37:48 UTC,12,1049,185,6.78
14	2016-11-01 15:36:48 UTC,13,972,152,6.44
15	2016-11-02 03:35:48 UTC,14,1045,145,6.52

Figura 5.2: Ejemplo de mediciones automatizadas de drenaje, CE y pH con indicación de fecha y hora en formato CSV, mediante la plataforma IdC [8]. El orden de los datos es el siguiente: año-mes-día hora:minutos:segundos UTC, número de dato, dato de drenaje, dato de conductividad y dato de pH.

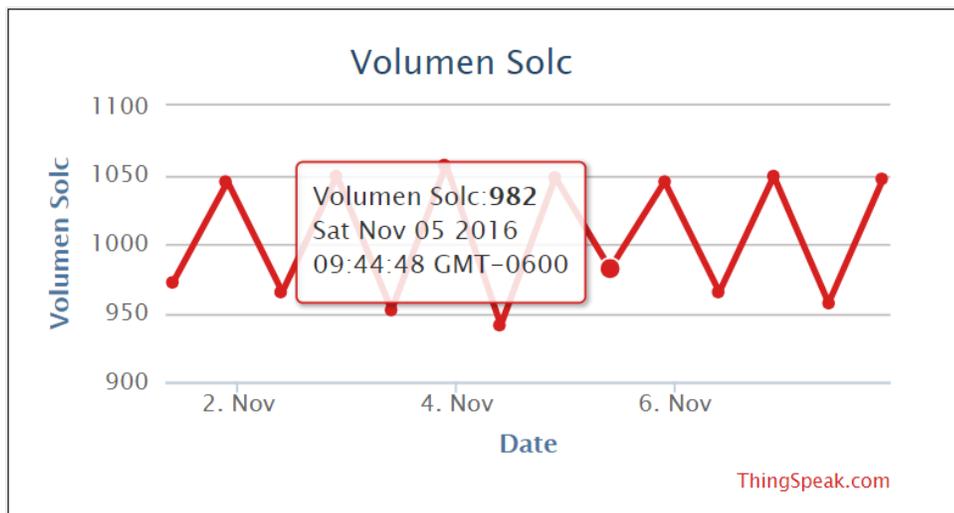


Figura 5.3: Ejemplo de medición de volumen de drenaje por medio de la plataforma IdC [8].



Figura 5.4: Ejemplo de medición de CE en el drenaje por medio de la plataforma IdC [8].

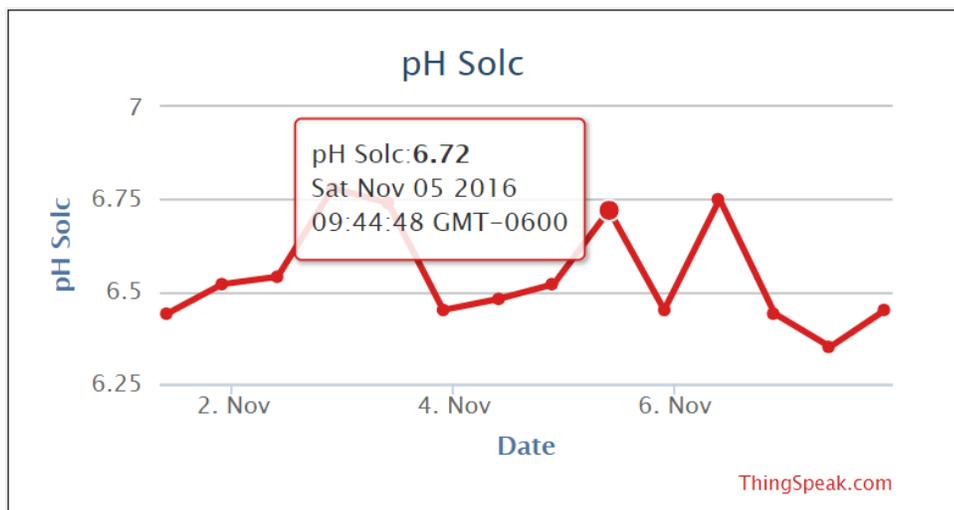


Figura 5.5: Ejemplo de medición de pH en el drenaje por medio de la plataforma IdC [8].

5.2.1 Integración de un controlador de lógica difusa para la toma de decisiones

Al final, es sin embargo claro que el uso de una plataforma en la nube trae dos potenciales problemas asociados: primero, que es necesario garantizar la conectividad, o al menos la seguridad de datos en caso de que la conectividad se pierda momentáneamente. Segundo, que el controlador hasta ahora ha sido evaluado sobre un software particular, lo que obviamente no sería muy práctico para un productor normal. Por ello, con el objetivo de disponer de una única plataforma de hardware que permita la toma de decisiones, se tomó la determinación de dotar al sistema embebido con la biblioteca eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library, por sus siglas en inglés) [63], para así contar ya con un controlador independiente de las necesidades de conectividad remota. Es claro que esta opción no es única: la autora investigó la posibilidad de resolver este problema mediante el uso de la biblioteca de lógica difusa de MATLAB en la misma plataforma de ThingSpeak, pero esta alternativa implicaba, primero, el depender de un software cerrado y con costos asociados a la compra de licencias para su uso y actualización. Otro aspecto tomado en consideración para el desarrollo del controlador en el sistema embebido y no en la plataforma de IdC, fue la dependencia del proveedor de dicha plataforma, así como la posible pérdida de datos en caso de fallas en el sistema remoto. Por lo anterior, se diseñó un controlador de lógica difusa “autónomo”, es decir que pueda tomar las decisiones en el sitio y enviar a la plataforma de IdC las variables que fueron analizadas por el controlador, así como la decisión en relación al fertirriego.

Características de biblioteca eFLL

Al estudiar las distintas opciones para integrar por completo el controlador difuso dentro del sistema IdC, se estudió con detalle la biblioteca eFLL. Esta biblioteca está escrita en C++/C y tiene la ventaja de solo depender de la biblioteca estándar `stdlib.h`, lo que significa que es fácil de portar. Además, ya ha sido probada sobre la plataforma Arduino, por lo que se adaptaba de manera casi inmediata con las plataformas desarrolladas a lo largo de esta tesis. En más detalle, dentro de las características técnicas determinantes para seleccionar el uso de eFLL se tienen las siguientes:

- No tiene limitaciones explícitas sobre la cantidad de reglas.
- No tiene limitaciones sobre la cantidad de entradas.
- No tiene limitaciones sobre la cantidad de salidas.
- Las limitaciones de procesamiento y almacenamiento están asociadas únicamente al microcontrolador utilizado.
- Contempla el uso de Máximos y Mínimos (MAX-MIN) para el procesamiento.
- Tiene integrado un controlador Mamdani.

- Soporta el uso de formas triangulares y trapezoidales tanto en entradas como salidas.
- Ha sido probado con GTest para C de Google Inc.
- Licencia de libre uso del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*, por sus siglas en inglés).
- Documentación actualizada y de libre uso.

En la documentación de la biblioteca se detallan siete objetos, en la tabla 5.1 se indican los nombres de cada objeto, así como la descripción y variables relacionadas a cada uno.

Tabla 5.1: Conjuntos y definición de reglas de lógica difusa para el problema de toma de decisiones sobre fertirriego tomando como base los conceptos lingüísticos de disponibilidad de agua y conductividad eléctrica [12, 13]

Nombre del objeto	Descripción del objeto
Fuzzy	Incluye todo el sistema difuso, a través de este objeto es posible definir los conjuntos difusos, reglas lingüísticas, entradas y salidas.
FuzzyInput	Agrupar todas las entradas del conjunto difuso que pertenecen al mismo dominio.
FuzzyOutput	Agrupar todas las salidas del conjunto difuso que pertenecen al mismo dominio.
FuzzySet	Con cada conjunto es posible modelar el sistema en cuestión. Admite funciones de pertenencia triangular, trapezoidal y singleton, que se ensamblan en función de los puntos A, B, C y D, y se pasan por el parámetro constructor (<code>float a, float b, float c, float d</code>).
FuzzyRule	Utilizado para montar la regla base del objeto difuso, que contiene uno o más de este objeto. Se crea una instancia con <code>FuzzyRule (ID, antecedente, consecuente)</code> .
FuzzyRuleAntecedent	Utilizado para componer el objeto <code>FuzzyRule</code> , es el responsable de ensamblar el antecedente de la expresión condicional de una <code>FuzzyRule</code> .
FuzzyRuleConsequent	Usado para representar el objeto <code>FuzzyRule</code> , responsable de ensamblar la expresión de salida de una <code>FuzzyRule</code> .

5.2.2 Ejemplo de codificación del controlador difuso de riego mediante la biblioteca eFFL

A continuación se muestran, simplemente como ejemplo de la versatilidad de la biblioteca eFFL, trozos del código generado para desarrollar el controlador embebido con su codificación de objetos, definición de entradas, salidas y reglas. El código completo del controlador desarrollado y comprobado se ofrece como un apéndice C al final de esta tesis.

El primer paso en la definición del controlador implica el llamado a los objetos y variables necesarias, tal cual se muestra en el listado 5.1. Una vez invocados dichos objetos, se procede a definir los conjuntos de entrada y salida del controlador, conjuntos ya explicitados con detalle en el capítulo 4. Los listados 5.2 y 5.3 ofrecen un ejemplo de la flexibilidad de generar dichos conjuntos, una vez realizada su definición como entrada o salida.

Listado 5.1: Código de llamada de objetos e inicialización de variables

```
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

int n=0;
int i=0;
```

En el listado 5.2 se inicializan las variables de pH, conductividad y drenaje.

Listado 5.2: Código de llamada de objetos e inicialización de variables

```
//pH
FuzzySet* muy_acido = new FuzzySet(0, 0.025, 0.175, 0.2);
FuzzySet* ligeramente_acido = new FuzzySet(0.190, 0.215, 0.365,
0.390);
FuzzySet* ideal = new FuzzySet(0.380, 0.405, 0.555, 0.580);
FuzzySet* ligeramente_alcalino = new FuzzySet(0.570, 0.595, 0.745,
0.770);
FuzzySet* muy_alcalino = new FuzzySet(0.760, 0.785, 0.935, 0.960);

/Conductividad
FuzzySet* baja = new FuzzySet(0, 0.1, 0.3, 0.4);
FuzzySet* buena = new FuzzySet(0.3, 0.4, 0.6, 0.7);
FuzzySet* alta = new FuzzySet(0.6, 0.7, 0.9, 1.00);
```

```
//Drenaje
FuzzySet* agua_muy_dificilmente_disponible = new FuzzySet(0, 0.15,
0.15, 0.3);
FuzzySet* agua_dificilmente_disponible = new FuzzySet(0.225, 0.375,
0.375, 0.525);
FuzzySet* agua_facilmente_disponible = new FuzzySet(0.450, 0.6,
0.6, 0.750);
FuzzySet* agua_muy_facilmente_disponible = new FuzzySet(0.675, 0.825,
0.825, 1.00);
```

Listado 5.3: Código para la definición del conjunto difuso de la salida

```
// FuzzyOutput
FuzzyOutput* riego = new FuzzyOutput(1);

FuzzySet* no_riego = new FuzzySet(0, 0.2, 0.2, 0.375);
riego->addFuzzySet(no_riego);
FuzzySet* riego_poco = new FuzzySet(0.225, 0.4, 0.4, 0.575);
riego->addFuzzySet(riego_poco);
FuzzySet* riego_normal = new FuzzySet(0.425, 0.6, 0.6, 0.775);
riego->addFuzzySet(riego_normal);
FuzzySet* riego_abundante = new FuzzySet(0.625, 0.80, 0.80, 1);
riego->addFuzzySet(riego_abundante);

fuzzy->addFuzzyOutput(riego);
```

Una vez definidos los conjuntos, se procedió a construir las reglas para el controlador, de nuevo bajo la guía del trabajo realizado en el capítulo 4. El Listado 5.4 ofrece un resumen de una de las reglas establecidas para la toma de decisiones por el controlador. En total se programaron seis reglas de lógica difusa por medio de eFLL para la toma de decisiones en el sistema embebido. En el apéndice C al final de esta tesis, también se han incluido las versiones finales de las reglas que toman las entradas de drenaje, conductividad y pH y brindan la decisión de salida considerando los términos lingüísticos.

Listado 5.4: Código para la definición de la regla 1 asociada a la toma de decisiones de riego

```
//=====Regla 1=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible *OR*
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible *AND*
Conductividad baja *OR*
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible *AND*
Conductividad baja *AND* pH muy alcalino
//
// SALIDA
// Riego abundante
//=====

FuzzyRuleAntecedent* drenaje_amdd = new FuzzyRuleAntecedent();
```

```
drenaje_amdd->joinSingle(agua_muy_dificilmente_disponible);

FuzzyRuleAntecedent* ph_muy_alcalino = new FuzzyRuleAntecedent();
ph_muy_alcalino->joinSingle(muy_alcalino);

FuzzyRuleAntecedent* conductividad_baja = new FuzzyRuleAntecedent();
conductividad_baja->joinSingle(baja);
```

5.2.3 Comprobación del controlador difuso integrado en un sistema embebido

Sin perder de vista que el objetivo principal de esta tesis es dotar a agricultores e investigadores de dispositivos interconectados de bajo costo para la toma de decisiones relacionadas con el fertirriego, se opta por utilizar un controlador Arduino UNO con el fin de integrar el eFLL. Cabe destacar que UNO es la tarjeta más robusta, la más utilizada y documentada de toda la familia Arduino. Consta de un microcontrolador ATmega328P, 14 pines de entradas/salidas digitales (de las cuales 6 pueden ser utilizadas como salidas de modulación de ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*, por sus siglas en inglés), 6 salidas analógicas, un oscilador a 16 MHz, un puerto serial (USB, *Universal Serial Bus*, por sus siglas en inglés) y por último, un puerto de programación serial (ICSP, *in-circuit serial programming*, por sus siglas en inglés) [64]. En la figura 5.6 se muestra el sistema embebido y la tarjeta de comunicación por telefonía celular para acceder a la plataforma IdC.

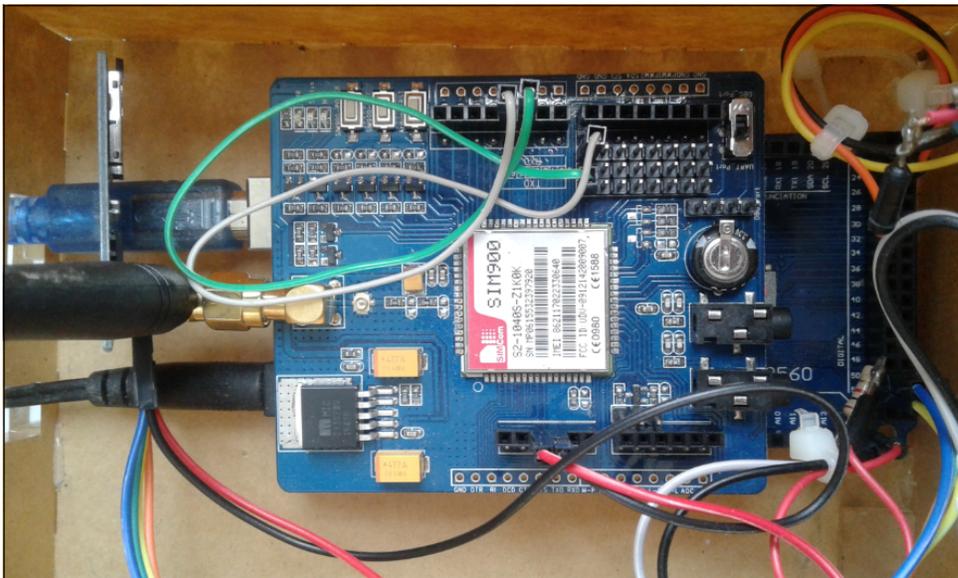


Figura 5.6: Microcontrolador Arduino con tarjeta de comunicación GSM para comunicación celular a la plataforma de IdC- ThingSpeak. La toma de decisiones por medio del controlador de lógica difusa se realiza mediante el uso de la librería eFLL la cual reside en el controlador [9].

En la figura 5.7, se muestra la salida del controlador de lógica difusa en la plataforma de IdC, durante siete días se adquirieron datos mediante el sistema automático de medición de drenaje, referido en el capítulo 2. El sistema midió valores constantes de aproximadamente un litro, ver nuevamente la figura 5.2 con los datos de drenaje, conductividad y pH. En total se consideraron catorce (14) datos, en cada línea de la tabla se indica lo siguiente: fecha, hora, número de dato, mililitros de drenaje, conductividad y pH.

El valor constante en la decisión de riego es producto precisamente del mantener constante el valor de riego (gracias en gran parte al sensor de monitoreo de drenaje desarrollado en esta tesis, que permite al productor ya de antemano coocer con precisión el drenaje real de su cultivo): al mantenerse constante el valor de drenaje se mantendrá igual la decisión de riego. Ello llevó a la necesidad de generar una prueba que evaluara la eficacia del controlador en todas las posibles combinaciones de entradas de interés. Para ello, se creó un conjunto de entradas aleatorio que buscaba verificar la respuesta correcta del controlador según los criterios usados para su definición. Este juego de respuestas se comprobaron por tanto con las decisiones de riego ya evaluadas en el capítulo 4, sobre la herramienta QtFuzzyLite. Se comprobó la concordancia de las decisiones de riego dadas por el QtFuzzyLite y el eFLL.

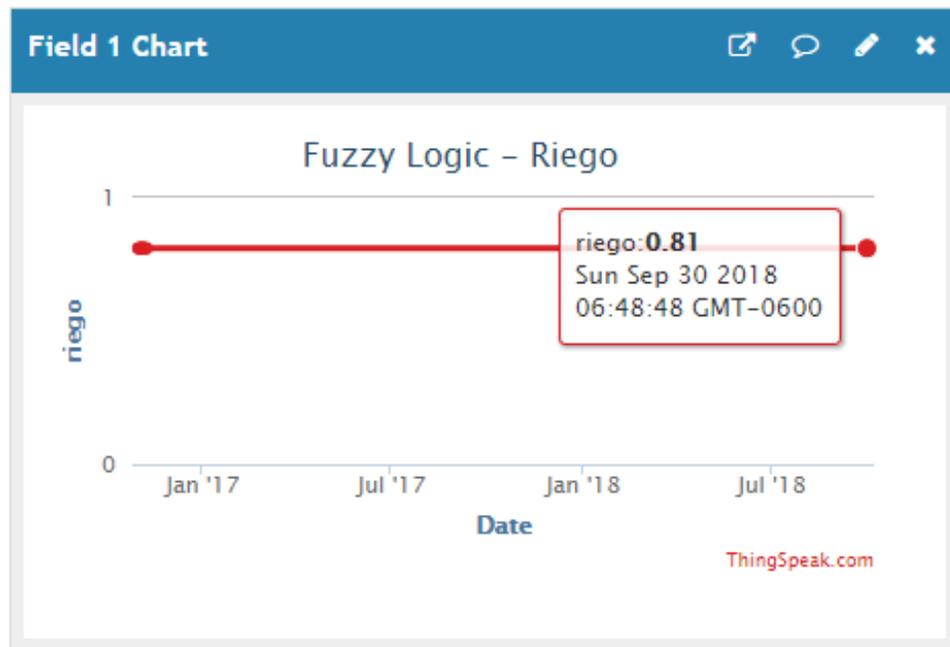


Figura 5.7: Ejemplo de decisión de riego mediante el uso del eFLL en un sistema autónomo, despliegue de decisión en la plataforma de IdC ThingSpeak [8]. Se evidencia decisión de riego con valor 0.81 como salida del FLC lo cual representa riego abundante. El valor constante de decisión durante el periodo de medición indica que la decisión de riego ha sido constante.

La figura 5.8, es un ejemplo de la evaluación de la funcionalidad del controlador de lógica difusa con el eFLL. Se comprueba visualmente que a mayor drenaje y conductividad (Field 1 Chart y Field 2 Chart) la decisión de riego (Field 4 Chart) está por debajo de la línea 0.5

por lo que se decide realizar poco riego. Cuando el valor de medición de drenaje se ubica el punto medio (1k) y la conductividad también está alrededor de su punto medio (2), la decisión de riego se ubica exactamente sobre el valor 0.5 lo que implica riego normal. Por último, cuando el drenaje es poco y la conductividad alta la decisión final es riego abundante.



Figura 5.8: Datos del controlador de lógica difusa en la plataforma IdC [8]. Se evidencian los cambios en las condiciones de drenaje, conductividad y pH, y la decisión de riego. Es importante destacar que 0.5 indica condición de riego normal, abajo de 0.5 es poco riego y superior es riego abundante.

La decisión de riego según el controlador se muestra en la figura 5.9, el valor 0.41 representa un valor cercano a la decisión lingüística de riego normal por lo que no deben realizarse cambios en la programación del sistema de fertirriego.

5.3 Internet de las Cosas en un cultivo de microalgas

En los antecedentes de esta tesis se detalló que a partir de las necesidades evidenciadas durante el desarrollo de los proyectos de investigación relacionados con el cultivo de microalgas, fue posible establecer los objetivos que pudieran dar respuesta a los problemas que enfrentaban investigadores y productores por la falta de herramientas de fácil uso y bajo costo, para la toma de decisiones relacionadas con los cultivos. El proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo de estanque semicerrado para el cultivo de mi-

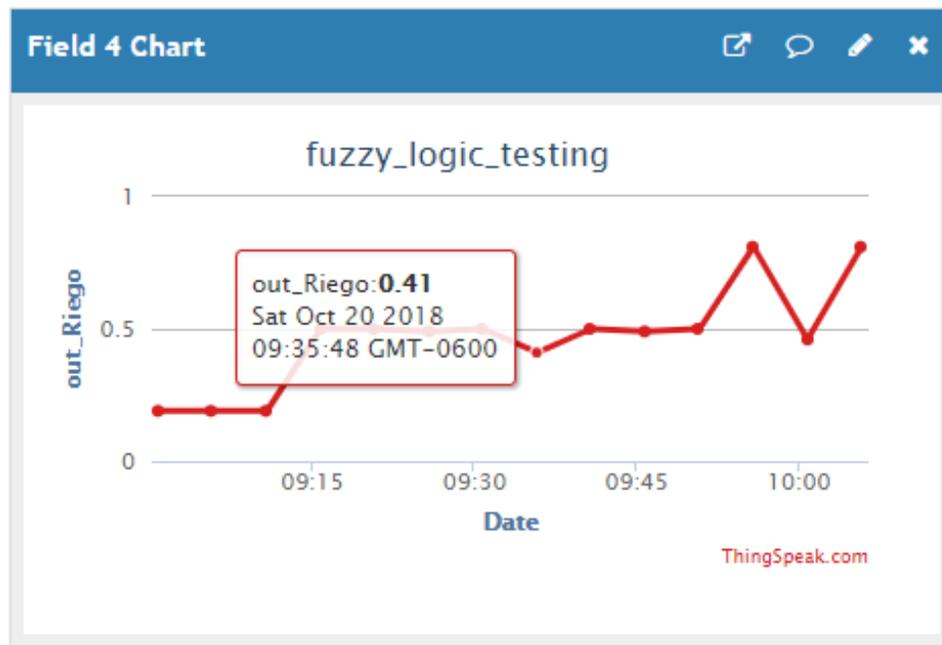


Figura 5.9: Decisión de riego mediante el uso del eFLL en el sistema autónomo, despliegue de decisión en la plataforma de IdC ThingSpeak [8]. Se evidencia decisión de riego con valor 0.41 como salida del FLC lo cual representa riego normal.

croalgas en forma semi masiva” (ver [17] para más detalles) tenía como objetivo principal evaluar los efectos del cambio climático sobre el cultivo de microalgas en estanques semicerrados como una forma de definir nuevas estrategias para mitigar el impacto de este fenómeno. Una aplicación principal de un sistema integrado como el que se propone aquí, sería la medición automática de variables relacionadas con el crecimiento cinético de la microalga *Chorella vulgaris* en un fotobiorreactor (*photobioreactor*, PBR por sus siglas en inglés). Se midieron el potencial de hidrógeno (pH), el oxígeno disuelto, la temperatura y la intensidad de la luz dentro de PBR. Esta información puede usarse para tomar decisiones sobre cómo aumentar la producción de biomasa de microalgas teniendo en cuenta su capacidad para capturar dióxido de carbono (CO_2) y liberar oxígeno (O_2) mientras produce biomasa que puede usarse como biofertilizante, biocombustible, entre otros. Las microalgas son un grupo de microorganismos unicelulares de crecimiento rápido, una de sus características más importantes es su capacidad para convertir de manera eficiente CO_2 en biomasa, que luego puede transformarse en gránulos y biocombustible. Según Borowitzka [65], este proceso de mitigación biológica presenta varias ventajas, como una tasa de crecimiento mucho más alta y una mayor capacidad de fijación de CO_2 en comparación con la silvicultura convencional, la agricultura y las plantas acuáticas. Varios estudios relacionados con la fijación CO_2 por microalgas se describen en la literatura [66, 67].

La ventaja de controlar y mantener las microalgas en condiciones óptimas de crecimiento en PBR es señalada por Stewart y Hessami [68]. Además, tal como lo menciona Weiming et al en [69], la operación eficiente de un PBR requiere un control estricto de las condiciones de crecimiento que es posible a través de la recopilación frecuente de datos del sistema.

El uso de la recolección y el análisis de muestras manuales no fue suficiente, además de ser laborioso y relativamente costoso, lo que hizo obvio el uso de un sistema IdC como el que se presenta aquí, ver figura 5.10.

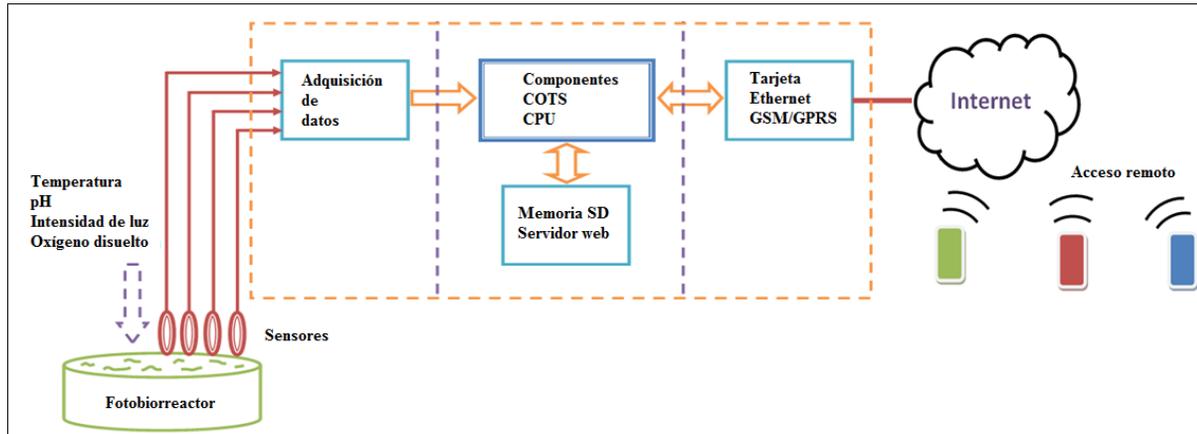


Figura 5.10: Representación esquemática del sistema embebido desarrollado aplicado a un cultivo de microalgas. Los sensores están inmersos en el PBR, y los datos se pueden visualizar de forma remota en una computadora a través de Internet. El sistema permitió a los investigadores de biotecnología monitorizar varios cultivos en lugares distantes, para evaluar el impacto en el crecimiento de algas de diferentes condiciones climáticas y altitudes. También se probaron diferentes soluciones nutritivas, y el sistema permitió la rápida implementación de varios experimentos estadísticos, que generalmente requieren una gran cantidad de datos, adaptado de [10].

5.3.1 Adquisición de datos para la toma de decisiones

En el caso de microalgas, los factores ambientales siguen siendo los mismos ya descritos que afectan el crecimiento de un cultivo: intensidad de luz, temperatura, pH, nutrientes, entre otros. Dado lo anterior, para el cultivo de microalgas (ver Tabla 5.2), se tomaron medidas tres veces por semana de forma manual, y se diseñó un experimento para determinar el efecto de diferentes medios de cultivo para el crecimiento cinético [20].

Para el sistema automatizado con capacidad de IdC, se definió un tiempo de muestreo de un minuto utilizado para la medición de pH, temperatura, oxígeno disuelto y luz. Todos los datos medidos se guardaron con un sello de tiempo y un archivo se creó automáticamente para cada día.

La tabla 5.2 resume los rangos ambientales típicos de variación de los que se consideran los parámetros determinantes para un cultivo de microalga *Chlorella vulgaris* en la región geográfica de interés (la región tropical). Los rangos que se esperan produzcan un crecimiento óptimo también están indicados. Esta información se usó para seleccionar los sensores requeridos. Es importante mencionar que la resolución, el tiempo de respuesta y el rango fueron los principales factores a considerar.

Tabla 5.2: Variables relacionadas con el cultivo de microalgas

Parámetros	Rango	Óptimo
Temperatura (°C)	16 - 27	18 - 24
Salinidad (g.l-1)	12 - 40	20 - 24
Intensidad de luz (lux) (depende del volumen y densidad)	1,000 - 10,000	2,500-5,000
Periodo de luz (Luz : oscuridad, horas)		16:8 (mín) 24:0 (máx)
pH	7 - 9	8.2 - 8.7

Para medir las variables ambientales relacionadas con el crecimiento del cultivo de microalgas se usaron cuatro sensores electrónicos diferentes: pH, temperatura, oxígeno disuelto y luz. Todos los sensores seleccionados fueron desarrollados por Vernier Company y están especialmente diseñados para ser utilizados en laboratorios biológicos y químicos. La microalga *Chlorella vulgaris* se cultivó en un PBR de 300 litros, los sensores mencionados se introdujeron en el medio y los datos medidos se guardaron en la memoria del dispositivo electrónico, véase la figura 5.11. Todos los tubos fluorescentes alrededor del PBR se fijaron para una duración de 12:12, lo que corresponde a 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.



Figura 5.11: Dispositivo con conexión a Internet por medio de la red Ethernet. Se realiza la medición de variables relacionadas con el crecimiento microalgal en un PBR, se almacenan los datos localmente y también remotamente en una plataforma con capacidades de IdC [10].

5.3.2 Propuesta de uso de eFLL en el cultivo de microalgas

La microalga *Chlorella vulgaris* se cultivó en un medio químico en condiciones de laboratorio donde se utilizó un dispositivo electrónico con capacidades de IdC para medir las variables ambientales relacionadas con el proceso de cultivo microalgal. La plataforma de IdC ThingSpeak resultó ser una interfaz estable y confiable para los usuarios. MATLAB analítica se utiliza para ver las tendencias de las variables ambientales a lo largo del eje del tiempo. La Figura 5.12 es una representación gráfica del valor de pH en el PBR, donde los datos se midieron automáticamente y se envían a la plataforma IdC con la indicación de fecha, hora y dato medido.

Los usuarios pueden ver la tendencia del gráfico y tener información sobre los valores de pH con la fecha y hora respectivas: ver por ejemplo el caso del 30 de mayo a las 14:00 horas, donde el valor de pH fue de 6,97, como se muestra en la Figura 5.12.

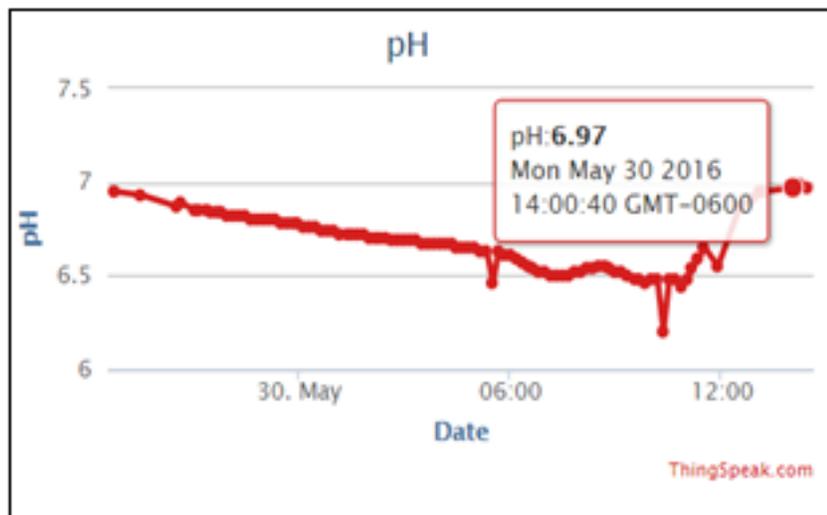


Figura 5.12: Ejemplo de medición automática de pH mediante el uso de la plataforma IdC - ThingSpeak [8], se evidencia un dato de pH con valor de 6,97 medido el lunes 30 de mayo a las 14:00:40.

Ahora, dados los resultados exitosos obtenidos en la aplicación de horticultura, es claro que, en el caso de microalgas, podría resultar beneficioso establecer un control similar que aumente la eficiencia del cultivo. Por esta razón, se propone utilizar la biblioteca eFLL, definir las reglas lingüísticas relacionadas con el crecimiento microalgal y establecer las decisiones que favorezcan el crecimiento manteniendo los rangos óptimos (según Tabla 5.2) de temperatura, salinidad, intensidad de luz, periodo de luz y pH.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado como un sistema embebido electrónico de bajo costo, con capacidades IdC, no solo es capaz de ofrecer la medición precisa de drenaje (capítulo 2)

en un cultivo de invernadero, o monitorear la medición de CE (capítulo 3) y procesar los datos para generar tomas de decisiones de un controlador de lógica difusa (capítulo 4), sino que es capaz de integrar todas dichas funciones en una sola plataforma, con resguardo contra pérdidas de conectividad.

En particular, el uso de la biblioteca eFLL demostró la flexibilidad y aplicabilidad inmediata de controladores difusos basados en reglas lingüísticas para problemas similares en que se requieren soluciones eficientes y rápidas que apoyen la productividad agrícola.

Además, el acceso del sistema a las herramientas analíticas y gráficas de IdC le permite a los investigadores tomar decisiones más inteligentes y rápidas, con la integración tanto del procesamiento local como del procesamiento en la nube. Una potencial aplicación derivada del trabajo hecho hasta ahora, es el desarrollo de un algoritmo de fusión multisensor para predecir el crecimiento cinético de microalgas, tomando en consideración varias variables. Este algoritmo se ejecutará en la nube, aprovechando al máximo las capacidades de procesamiento, almacenamiento y acceso remoto de la plataforma IdC.

Resulta por tanto claro que el uso de dispositivos de IdC inteligentes como el que se propone aquí, apunta en la dirección de construir herramientas más asequibles para los productores en regiones tropicales que desean asegurar sus cultivos contra los efectos del cambio climático. El sistema desarrollado se puede utilizar para muchas otras aplicaciones, tales como: monitoreo de invernaderos, monitoreo de bosques y plantaciones al aire libre e incluso monitoreo de redes eléctricas inteligentes. Solo es necesario reemplazar los sensores para la aplicación prevista, y las capacidades de procesamiento de datos de la nube se pueden usar incluso para aplicaciones más específicas, como el control remoto y las plataformas inteligentes de decisión.

En el futuro, se pretende que los sistemas IdC como el presentado en este capítulo se utilicen para generar modelos más precisos de crecimiento de cultivos, donde las variables secundarias puedan analizarse para anticipar el desarrollo estructural del proceso de crecimiento de las plantas y maximizar la producción de vegetales mientras se minimiza el uso de agua, nutrientes y fertilizantes para apuntar al compromiso de Costa Rica de convertirse en el primer país C-neutral.

5.5 Recomendaciones

Dado que fue posible integrar el controlador de lógica difusa directamente en el microcontrolador y enviar la decisión tomada a la plataforma IdC, se recomienda evaluar el sistema en nuevos cultivos hortícolas o cultivos microalgales para revalidar al funcionalidad de la biblioteca eFLL. También es recomendable, implementar el análisis de la lógica difusa en la plataforma IdC para así contar con redundancia en la toma de decisiones.

Capítulo 6

Conclusiones

El desarrollo de la presente tesis permitió alcanzar el objetivo de diseñar un modelo de estimación y toma de decisiones en procesos naturales mediante la medición y multiprocesamiento de variables ambientales por medio de Internet de Cosas. Es importante destacar que además del diseño se logró implementar y probar cada una de las partes involucradas en el cumplimiento del objetivo inicial propuesto.

Se ha desarrollado un sistema electrónico asequible basado en hardware y software, que se utiliza para mejorar automáticamente la precisión de la medición de drenaje en horticultura de invernadero, las capacidades de Internet de las Cosas son evidenciadas. Fue posible mejorar la precisión en las mediciones mediante el uso del filtro de Kalman, de manera que quedó demostrado el potencial del sistema. Específicamente, para la medición automática de drenaje, la exactitud fue mejorada diez veces con respecto a las especificaciones técnicas del sensor, pues, según la hoja de datos técnicos brindada por el proveedor el medidor de flujo de líquido indica una precisión de $\pm 10\%$, mientras que el resultado final tras el filtrado de Kalman implementado alcanzó una precisión de $\pm 1\%$. Dicho sistema de medición ha sido totalmente integrado a la nube para su uso durante mediciones masivas y automáticas.

El uso del sistema IdC permite la incorporación de sensores asequibles ajustados a través de algoritmos de fusión de datos estándar, como el filtrado de Kalman y otras técnicas que se ejecutan en la nube o en el propio sistema, como fue realizado en el capítulo 2. El acceso del sistema a las herramientas analíticas y gráficas de IdC le permite a los investigadores tomar decisiones más inteligentes y rápidas, con la asistencia potencial del procesamiento de toma de decisiones, como los controladores de lógica difusa, que han sido propuestos en los capítulos 4 y 5.

Posteriormente, en la búsqueda de un material que pudiera permanecer sumergido en el envase de recolección de drenaje, se determinó en el capítulo 3 que el nicromio presenta características metalográficas idóneas en comparación con el material original para ser utilizado como electrodo en medios acuosos altamente salinos. La aleación presenta una elevada resistencia a la corrosión cuando es evaluada bajo la norma ASTM A117. Las

probetas no presentan señales de corrosión significativas ni evidentes cuando se evalúa de forma superficial y subsuperficial. El comportamiento electroquímico de la aleación cuando es evaluada en tres diferentes medios es prácticamente el mismo.

Por lo tanto, las probetas expuestas al protocolo de pruebas en la cámara de corrosión acelerada fueron sometidas a mediciones de corriente y de conductividad mediante el uso de sustancias patrón. Los resultados experimentales obtenidos evidencian numérica y gráficamente que los electrodos son resistentes a medios acuosos altamente salinos y que se mantendrá la medición de conductividad eléctrica dentro de los rangos aceptables de acuerdo a la temperatura del medio acuoso. Los resultados fueron contundentes para justificar la aplicación a la patente de invención, en proceso de otorgamiento, titulada “CR20170516 (A) - Sensor de conductividad resistente a medios acuosos altamente salinos” (donde la A representa el estado de publicación y CR es por Costa Rica).

Seguidamente, mediante el uso de un controlador de lógica difusa de Mamdani con un método máximo y salida centroide, es posible determinar la decisión de riego tomando en consideración las entradas de drenaje, conductividad y pH. La librería eFLL cuenta con las herramientas apropiadas para el desarrollo del controlador difuso en una plataforma de bajo costo, tal como es el caso del Arduino Uno, con el cual se comprobó el buen funcionamiento para el sistema de toma de decisiones mediante un controlador Mamdani con entradas de formas trapezoidales (conductividad y pH) y triangular (drenaje), para la decisión de riego se estableció una salida de forma triangular. La decisión de no riego, riego poco, riego normal y riego abundante es evidenciada en la plataforma de IdC con una indicación numérica que está relacionada a los términos lingüísticos de las entradas y salidas del sistema. En el capítulo 5, se evidencia el uso del microcontrolador Arduino como plataforma de prueba y validación del controlador difuso y de la conectividad con el sistema de IdC (ThingSpeak).

El sistema fue validado mediante el cumplimiento de reglas de lógica difusa establecidas a partir del criterio experto de investigadores relacionados con cultivos hortícolas en ambientes protegidos. Mediante los términos lingüísticos establecidos para el problema de toma de decisiones relacionadas con el fertirriego, se valida el criterio de experto que dió lugar al conjunto y definición de reglas.

El sistema experto desarrollado tiene la particularidad de poder ser ampliado en cantidad de entradas o salidas, según los requerimientos de cada cultivo, para aumentar el conjunto de variables de entradas solo se deben incorporar nuevas reglas asociadas a las mismas. Por ejemplo, es posible adicionar nuevas variables de interés como lo son: tensión de sustrato, contenido de nitratos, calcio, potasio, sulfatos, conductividad eléctrica y temperatura en el sustrato, entre otros.

Por último, se concluye que, un sistema embebido electrónico completo con capacidades de IdC fue utilizado para mejorar la precisión de la medición de drenaje (ver nuevamente el capítulo 2) en horticultura en invernadero, con medición de CE (en el capítulo 3) y el planteamiento de una patente asociada al desarrollo de un sensor de conductividad eléctrica para medios acuosos altamente salinos (en el apéndice A). Para la toma de

decisiones mediante un controlador de lógica difusa se utiliza el software QtFuzzyLite en el capítulo 4. Posteriormente, en el capítulo 5 se consolidan todas las secciones previas por medio de un sistema embebido autónomo de IdC aplicado y probado con la biblioteca eFLL y datos relacionados con cultivos hortícolas. Para terminar, en esa misma sección se propone el uso de eFLL para la toma de decisiones relacionadas con el crecimiento cinético de la microalga *Chorella vulgaris* cultivada en un PBR.

Esta tesis ha demostrado cómo el uso de dispositivos IdC inteligentes, como los propuestos, puede proveer de herramientas fundamentales y asequibles para los productores en regiones tropicales que desean asegurar sus cultivos contra los efectos del cambio climático. Entre otras potenciales aplicaciones, el sistema mostrado en esta tesis se puede utilizar para muchas otras aplicaciones, tales como: monitorización de invernaderos, bosques y plantaciones al aire libre, supervisión de redes eléctricas inteligentes, adaptar algunos de los algoritmos usados de control y filtrado, y aprovechar las capacidades de procesamiento de datos en la nube, incluso para aplicaciones más específicas, como el control remoto y las plataformas inteligentes de decisión.

En el futuro, se pretende que los sistemas IdC como el desarrollado en esta tesis de doctorado se utilicen para generar modelos más precisos de crecimiento de cultivos, donde las variables secundarias puedan analizarse para anticipar el desarrollo estructural del proceso de crecimiento de las plantas y maximizar la producción de vegetales mientras se minimiza el uso de agua, nutrientes y fertilizantes para apuntar al compromiso de Costa Rica de convertirse en el primer país C-neutral.

6.1 Recomendaciones

Los modelos de lógica difusa para la toma de decisiones de programación de riego se pueden implementar considerando variables tales como: humedad del sustrato, medición de nitratos, fosfatos, temperatura y humedad ambiental dentro y fuera del invernadero; todas estas variables pueden ser priorizadas para ser agregadas a las reglas de inferencia necesarias para anticipar las necesidades de agua de las plantas durante su proceso de crecimiento, floración o producción, maximizando así su desempeño y minimizando el uso de agua, nutrientes y fertilizantes. Para ello, la evaluación del controlador con una producción de cultivos en curso es obligatoria, donde también se establece un grupo de control de plantas para proporcionar una prueba de campo más rigurosa del controlador propuesto.

Dado que fue posible integrar el controlador de lógica difusa directamente en el microcontrolador y enviar la decisión tomada a la plataforma IdC, se recomienda evaluar el sistema en nuevos cultivos hortícolas o cultivos microalgales para revalidar la funcionalidad de la biblioteca eFLL. También es recomendable, implementar el análisis de la lógica difusa en la plataforma IdC para así contar con redundancia en la toma de decisiones.

6.2 Trabajo futuro

Los resultados de la tesis doctoral han marcado el punto de partida para la realización de futuros trabajos en el ámbito de lo que se conoce como “control avanzado de procesos”. En primera instancia, se analizará la inclusión del control basado en eventos para determinar si es posible optimizar la toma de decisiones con menor cantidad de datos. Actualmente, los sistemas ofrecen la facilidad de configurar la frecuencia con que se desea muestrear los datos, pero muchas veces los cambios son mínimos o de poca relevancia para la toma de decisiones y ya hubo un gasto computacional y de recursos de comunicación en un dato que no será útil. Por lo anterior, se incursionará en el modelado de control basado en eventos en variables naturales relacionadas con horticultura en ambientes protegidos.

Además, se definirá como línea de investigación el desarrollo de dispositivos y elementos de medición de variables naturales que permitan optimizar el uso del recurso hídrico. Por lo anterior, se vislumbra la posibilidad de seguir incursionando en la generación de patentes y modelos de utilidad.

Bibliografía

- [1] S. Jakhete, “Modeling plant growth via the usage of functions: A study of implementations of constants for predicting growth,” 2013.
- [2] L. E. Cordero-Arias, “Resultados de electroquímicos de comparación entre una aleación de nicromio y otra desconocida perteneciente a un sensor,” pp. 1 – 5, 03 2018.
- [3] L. Cordero, N. Cruz, and L. Garbanzo, “Resultados de (i) cámara salina (ii) metalografía y (iii) curvas potencia dinámicas de polarización para prof. arys carrasquilla,” pp. 1 – 5, 08 2017.
- [4] keysight Technologies, “Hoja de datos técnicos, precision source/measure unit b2900a series,” in <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-7009EN.pdf?id=2035016>, 2018, pp. 1–24.
- [5] A. Carrasquilla-Batista and A. Chacon-Rodriguez, “Proposal of a fuzzy logic controller for the improvement of irrigation scheduling decision-making in greenhouse horticulture,” in *2017 1st Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics Latin America (PRIME-LA)*, Feb 2017, pp. 1–4.
- [6] N. C. Prados, *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Ediciones Mundi-Prensa, segunda edición, 2007.
- [7] J. Rada-Vilela, “fuzzylite documentation: a fuzzy logic control library,” 2017, <http://www.fuzzylite.com/>.
- [8] I. T. MathWorks, *ThingSpeak Documentation*, 2017, <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/index.html>.
- [9] A. Carrasquilla-Batista and A. Chacón-Rodríguez, “A fuzzy logic controller with internet of things (iot) capabilities and cots components for monitoring and mitigation of climate change effects on sensible tropical crops,” in *68th International Astronautical Congress 2017 (IAC 2017)*. Publ: International Astronautical Federation (IAF), (September 2017), 2017.
- [10] —, “Integrated processing and control of multiple environmental variables through internet of things (iot) using cots components,” in *66th International Astronautical Congress 2017 (IAC 2017)*, vol. 7, no. ISBN 9781510818934, Source: Scopus. Publ:

- International Astronautical Federation (IAF), POD Publ: Curran Associates, Inc. (Jul 2016), 2016, pp. 4898–4904.
- [11] M. V. Quiñónez-Fernández, “Uso de la fibra de coco como sustrato en la producción de pascua para exportación,” in *Trabajo final de graduación, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Guatemala*, 2014, pp. 1–66.
- [12] M. Solorzano-Quintana, “Criterio de experto, ing. milton solorzano-quintana, escuela de ingeniería agrícola, instituto tecnológico de costa rica,” p. 1, 03 2017.
- [13] C. Ramírez-Vargas, “Criterio de experto, escuela de agronomía, instituto tecnológico de costa rica,” p. 1, 10 2017.
- [14] C. Ramírez-Vargas, A. Carrasquilla-Batista, and O. Córdoba, “Informe final de proyecto de investigación: Horticultura protegida en tres zonas agroecológicas de costa rica,” pp. 1 – 128, 06 2012. [Online]. Available: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2943>
- [15] J. Bertoni and F. L. Neto, *Conservação do solo*. Piracicaba, 1985.
- [16] A. Jiménez-Morales, “Hidroponía popular ¿cómo producir sus hortalizas en el patio de la casa?” 2016.
- [17] M. Guerrero-Barrantes, P. Solera-Steller, and A. Carrasquilla-Batista, “Informe final de proyecto de investigación: Desarrollo de un prototipo de estanque semi-cerrado para el cultivo de microalgas en forma semi-masiva,” pp. 1 – 69, 04 2014. [Online]. Available: <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3374>
- [18] M. Guerrero-Barrantes, “Desarrollan sistema integrado para la producción de microalgas acoplado a un biodigestos y a un emisor de c02,” *Investiga TEC*, pp. 21 – 22, 01 2014. [Online]. Available: <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3374>
- [19] A. Carrasquilla-Batista, M. Guerrero-Barrantes, K. Meneses-Montero, J. Valverde-Cerdas, J. Quesada-Kimzey, K. Núñez-Montero, and O. Gómez-Espinoza, “Internet de las cosas y microalgas:¿qué tienen en común?” *Investiga TEC*, no. 25, pp. 18–20, 2016.
- [20] A. Carrasquilla-Batista, A. Chacón-Rodríguez, K. Núñez-Montero, O. Gómez-Espinoza, J. Valverde-Cerdas, and M. Guerrero-Barrantes, “Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 29, pp. 33 – 45, 12 2016. [Online]. Available: http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2983
- [21] A. Carrasquilla-Batista, A. Chacón-Rodríguez, M. Solórzano-Quintana, and M. Guerrero-Barrantes, “Iot applications: On the path of costa rica’s commitment to becoming carbon-neutral,” in *2017 International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC)*, July 2017, pp. 1–6.

- [22] A. Carrasquilla-Batista, A. Chacón-Rodríguez, F. Murillo-Vega, K. NUñez-Montero, O. Gómez-Espinoza, and M. Guerrero-Barrantes, “Characterization of biomass pellets from *chlorella vulgaris* microalgal production using industrial wastewater,” in *2017 International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies (ES2DE)*, July 2017, pp. 1–6.
- [23] A. Carrasquilla-Batista, “Informe final de pasantía, programa de doctorado académico en ingeniería,” pp. 1–21, 05 2016.
- [24] J. E. Monge-Pérez, J. F. Argüello-Delgado, and M. Solórzano-Quintana, “Efecto del cambio climático en la producción de hortalizas en costa rica,” *Repositorio TEC - Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE)*, pp. 1 – 139, 02 2018. [Online]. Available: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9985/efecto_cambio_climatico_produccion_hortalizas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [25] F. Marín-Thiele, “Cuantificación y valoración de estructuras y procesos de producción agrícola bajo ambientes protegidos en costa rica,” 2010.
- [26] J. B. Hernández-Palomo, “Respuesta fisiológica y eficiencia de uso de agua en *capsicum annum* l. en un sistema hidropónico con déficit de riego y drenaje cero,” *Postgrado de recursos genéticos y productividad fisiológica vegetal (Maestro de ciencias)*, 2014. [Online]. Available: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2446/Hernandez_Palomo_JB_MC.Fisiologia_Vegetal.2014.pdf?sequence=1
- [27] D. Evans, “Internet of things - how the next evolution of the internet is changing everything,” *White paper Cisco Internet Business Solutions Group- IBSG*, 2011.
- [28] S. Khandani, “Education transfer plan - engineering design process,” *IISME - Solec-tron*, Agosto 2005.
- [29] S. Haykin, *Kalman Filtering and Neural Networks - Adaptive and Cognitive Dynamic Systems: Signal Processing, Learning, Communications and Control*. Wiley and Sons, 2004.
- [30] R. Salazar-Moreno, A. Mauricio-Pérez, I. López-Cruz, and A. Rojano-Aguilar, “A model of humidity within a semi-closed greenhouse,” *Revista Chapingo. Serie horticultura*, vol. 22, pp. 27 – 44, 04 2016. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2016000100027&nrm=iso
- [31] A. Carrasquilla-Batista, A. Chacón-Rodríguez, and M. Solórzano-Quintana, “Using iot resources to enhance the accuracy of overdrain measurements in greenhouse horticulture,” in *2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCA-PAN XXXVI)*, Nov 2016, pp. 1–5.
- [32] A. I. Carrasquilla Batista, “Sensor de conductividad resistente a medios acuosos altamente salinos,” noviembre 2017, cR 20170516 (A), Patente pendiente.

- [Online]. Available: https://worldwide.espacenet.com/searchResults?AB=&AP=&CPC=&DB=EPODOC&IC=&IN=&PA=&PD=&PN=CR20170516A&PR=&ST=advanced&TI=&bcId=1&locale=en_EP&page=0&return=true
- [33] J. C. Valverde-Conejo, *Riego y drenaje*. Editorial Universidad Estatal a Distancia, segunda reimpresión, 2007.
- [34] O. Valenzuela, C. Gallardo, M. Carponi, M. Aranguren, H. Tabares, and M. Barrera, “Manejo de las propiedades físicas en sustratos regionales para el cultivo de plantas en contenedores,” *Ciencia, Docencia y Tecnología*, vol. 4, no. 4, pp. 01–19, 2014.
- [35] L. Barbaro, *Importancia del pH y la Conductividad (CE) en los sustratos para plantas*. Ediciones INTA, Argentina, 2014.
- [36] F. Soto-Bravo, “Hidroponía familiar en sustrato: hágalo fácil sembrando hortalizas, cosechando salud,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10809.pdf>
- [37] Texas-Instruments, “Hoja de datos técnicos, sensor de temperatura lm35,” in <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>, 2018, pp. 1–36.
- [38] Honeywell-International, “Hoja de datos técnicos, sensor hih-4000,” in <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-ih4000-series-product-sheet-009017-5-en.pdf>, 2010, pp. 1–6.
- [39] Vernier, “Hoja de datos técnicos, sensor de intensidad de luz ls-bta,” in <https://www.vernier.com/files/manuals/ls-bta/ls-bta.pdf>, 2016, pp. 1–2.
- [40] Sparkfun, “Hoja de datos técnicos, sensor humedad de sustrato sen:13322,” in <https://www.sparkfun.com/products/13322>, 2018, p. 1.
- [41] Vernier, “Hoja de datos técnicos, sensor de ph ph-bta,” in <https://www.vernier.com/files/manuals/ph-bta/ph-bta.pdf>, 2016, pp. 1–2.
- [42] Pure-Atomist, “Hoja de datos técnicos, cable de nicromo 80 32 awg,” in <https://pureatomist.com/collections/nichrome-80-wire>, 2017, p. 1.
- [43] Adafruit, “Hoja de datos técnicos, sensor de flujo id:828,” in <https://www.adafruit.com/product/828>, 2018, p. 1.
- [44] M. Lee, J. Hwang, and H. Yoe, “Agricultural production system based on iot,” in *2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering*, Dec 2013, pp. 833–837.
- [45] D. Kumar, S. Rajasegarar, and M. Palaniswami, “Automatic sensor drift detection and correction using spatial kriging and kalman filtering,” in *2013 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, May 2013, pp. 183–190.

- [46] A. Chacon-Rodriguez, P. Julian, and F. Masson, "Fast and low power integrated circuit for impulsive sound localisation using kalman filter approach," *Electronics Letters*, vol. 46, no. 7, pp. 533–534, April 2010.
- [47] Y. C. Kim, Y. S. Ihn, H. R. Choi, S. M. Lee, and J. C. Koo, "Implementation of force sensor with multi strain gauges for enhancing accuracy and precision," in *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, July 2010, pp. 192–195.
- [48] A. P. Savva and K. Frenken, *Crop water requirements and irrigation scheduling*. FAO Sub-Regional Office for East and Southern Africa Harare, 2002.
- [49] H. Jones, "Irrigation scheduling—comparison of soil, plant and atmosphere monitoring approaches," in *V International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 792*, 2006, pp. 391–403.
- [50] Y. RR and L. A. Zadeh, *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*, 01 1992.
- [51] F. Capraro, D. Patino, S. Tosetti, and C. Schugurensky, "Neural network-based irrigation control for precision agriculture," in *2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, April 2008, pp. 357–362.
- [52] M. Valdés-Vela, I. Abrisqueta, W. Conejero, J. Vera, and M. C. Ruiz-Sánchez, "Soft computing applied to stem water potential estimation: A fuzzy rule based approach," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, pp. 150 – 160, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169915001556>
- [53] C. Schugurensky and F. Capraro, "Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. aplicaciones en vid y olivo," 03 2008.
- [54] D. Rice, R. Carriveau, and D. Ting, "Commercial greenhouse water demand sensitivity analysis: Single crop case study," vol. 16, 03 2016.
- [55] D. C. J. Rice, R. Carriveau, D. S. K. Ting, and M. H. Bata, "Evaluation of crop to crop water demand forecasting: Tomatoes and bell peppers grown in a commercial greenhouse," *Agriculture*, vol. 7, no. 12, 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2077-0472/7/12/104>
- [56] L. Gao, M. Zhang, and G. Chen, "An intelligent irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control." *JNW*, vol. 8, no. 5, pp. 1080–1087, 2013.
- [57] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio, and A. Mami, "Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring," *ISA transactions*, vol. 61, pp. 297–307, 2016.

- [58] P. N. y. C. C. M. Abad, *Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación*. pp. 299-354. Cadahía, C. (ed.). Fertirrigación Cultivos Hortícolas, Frutales y Ornamentales. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa, 2005.
- [59] A.García-Serrano, *Inteligencia Artificial*. Alfaomega, 2da edición, 2016.
- [60] R. Dobles-Mora, “Costa rica’s commitment: On the path to becoming carbon-neutral,” vol. XLIV, no. 2, 06 2007. [Online]. Available: <https://unchronicle.un.org/article/costa-rica-s-commitment-path-becoming-carbon-neutral>
- [61] J. C. Valverde-Conejo and M. Villalobos-Araya, *Principios de riego y drenaje en suelos tropicales*. Editorial Universidad Estatal a Distancia, 2016.
- [62] A. Hayashi, K. Akimoto, T. Tomoda, and M. Kii, “Global evaluation of the effects of agriculture and water management adaptations on the water-stressed population,” *Mitigation and adaptation strategies for global change*, vol. 18, no. 5, pp. 591–618, 2013.
- [63] A. Alves. (2016) Embedded fuzzy logic library (efll), biblioteca estándar para sistemas embebidos. [Online]. Available: <https://github.com/zerokol/eFLL>
- [64] Arduino, *Arduino Documentation*, 2018, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [65] M. Borowitzka, “Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters,” vol. 70, pp. 313–321, 04 1999.
- [66] E. Sydney, W. Sturm, J. de Carvalho, V. Thomaz-Soccol, C. Larroche, A. Pandey, and C.R.Soccol, “Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae,” pp. 1 – 5, 08 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.088>
- [67] B. Wang, Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan, “Co₂ mitigation using microalgae,” vol. 79, pp. 707–718, julio 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1518-y>
- [68] C. Stewart and M.-A. Hessami, “A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration - the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach,” vol. 46, pp. 403–420, 02 2005.
- [69] W. Cai, N. Dunford, N. Wang, S. Zhu, Y. Wan, and Y. Zhu, “Development of an automated algae growth system,” vol. 4, 01 2013.

Apéndice A

Patente de invención

En este apéndice se detalla la redacción completa de la patente de invención denominada - Sensor de conductividad resistente a medios acuosos altamente salinos. La documentación fue presentada en el Registro Nacional de la República de Costa Rica y se tiene como fecha de prioridad el 10 de noviembre del 2017.

A.1 Campo técnico

La presente invención se relaciona al campo de la medición de variables eléctricas, en específico con la medición de resistencia, reactancia, impedancia o características eléctricas que se deriven de las mismas y más particularmente proporciona un sensor de conductividad.

A.2 Antecedentes de la invención

Para justificar la selección o cambio del material para el electrodo, se recomienda evaluar el material de electrodo original en agua, nutriente y lixiviado.

Dentro del estado de la técnica, se han descrito distintos sensores de conductividad, los cuales son adecuados para operar en diferentes condiciones.

Por ejemplo, el documento US 8,988,083 describe un sensor de conductividad que comprende una estructura de cuatro electrodos concéntricos que se soportan en un extremo de un cuerpo de soporte. Dichos electrodos poseen área constante a fin de utilizar un espacio tan pequeño como sea posible.

Por otra parte, el documento EP 1089072 describe un sensor de conductividad cuyos electrodos se disponen de manera planar en un extremo de una carcasa cilíndrica. Sin embargo, dicho sensor de conductividad no posee simetría rotacional dado que los electrodos se disponen en una forma de semicírculo. Lo anterior dificulta el posicionamiento

de los electrodos en la carcasa que forma parte del sensor.

Sin embargo, no existen, en el estado de la técnica, sensores de conductividad adecuados para su uso en medios acuosos altamente salinos que puedan permanecer sumergidos por tiempos largos sin requerir reemplazo ni calibración.

A.3 Sumario de la invención

La presente invención proporciona un sensor de conductividad que se caracteriza porque comprende: un cuerpo planar que posee una perforación pasante, dicha perforación pasante que posee una sección transversal con al menos dos lados esencialmente paralelos enfrentados entre sí; y dos electrodos metálicos, fijados a dicho cuerpo planar, cada uno que posee una porción expuesta y una porción aislada, en donde las porciones expuestas de dichos electrodos metálicos se posicionan en lados opuestos de dicha perforación pasante; en donde dicho cuerpo planar está construido de un material inerte a medios salinos; y en donde dichos electrodos metálicos están contruidos de un material conductor resistente a la corrosión.

En una realización preferida, el sensor de conductividad se caracteriza porque comprende, adicionalmente, un sensor de temperatura fijado a dicho cuerpo planar.

En otra realización preferida, el sensor de conductividad se caracteriza porque dicha perforación pasante de dicho cuerpo planar posee una sección transversal de forma rectangular y un área de 1 cm^2 . En una realización más preferida, el sensor de conductividad se caracteriza porque dicha perforación pasante posee una sección transversal de forma cuadrada cuyos lados tienen una longitud de 1 cm.

En una realización preferida adicional, el sensor de conductividad se caracteriza porque dicho cuerpo planar posee un ancho menor a 3 cm.

En otra realización preferida, el sensor de conductividad se caracteriza porque dicho material inerte a medios salinos es acrílico.

En una realización preferida adicional, el sensor de conductividad se caracteriza porque comprende, adicionalmente, un cuerpo sólido que presiona las porciones aisladas de dichos electrodos contra dicho cuerpo planar.

A.4 Breve descripción de las figuras

La Figura A.1 muestra una vista en perspectiva isométrica de una primera realización del sensor de conductividad que es objeto de la presente invención

La Figura A.2 muestra una vista superior de una primera realización del sensor de conductividad que es objeto de la presente invención.

La Figura A.3 muestra una vista lateral de una primera realización del sensor de conductividad que es objeto de la presente invención.

A.5 Descripción detallada de la invención

La medición de drenaje y nutrientes en los cultivos hidropónicos o en sustratos requieren de la medición continua o por lo menos diaria de la conductividad eléctrica para la toma de decisiones relacionadas con la cantidad de nutrientes que deben ser suministrados a las plantas, así como para la programación de la cantidad y frecuencia del riego o fertiriego. El sensor de conductividad eléctrica objeto de la presente invención tiene la ventaja que puede permanecer sumergido en medios altamente salinos sin necesidad de recalibración ni mantenimiento continuo. La medición de conductividad es autocompensada automáticamente por el sensor de temperatura. Dicho sensor puede utilizarse en medios líquidos, sustratos o tierra. En lo sucesivo, se describirá en detalle la invención haciendo referencia para esto a las figuras que acompañan la presente solicitud.

Como se observa en las Figuras A.1 a A.3, la presente invención proporciona un sensor de conductividad (1) que comprende, de manera esencial, un cuerpo planar (2) que posee una perforación pasante (3), dicha perforación pasante (3) que posee una sección transversal con al menos dos lados esencialmente paralelos (3a, 3b) enfrentados entre sí; y dos electrodos metálicos (4a, 4b), fijados a dicho cuerpo planar (2), cada uno que posee una porción expuesta (41a, 41b) y una porción aislada (42a, 42b), en donde las porciones expuestas (41a, 41b) de dichos electrodos metálicos (4a, 4b) se posicionan en dichos lados opuestos (3a, 3b) de dicha perforación pasante (3); en donde dicho cuerpo planar (2) está construido de un material inerte a medios salinos; y en donde dichos electrodos metálicos (4a, 4b) están contruidos de un material conductor resistente a la corrosión.

Debe entenderse como cuerpo planar (2), aquél en donde el espesor del mismo es mucho menor que sus dimensiones laterales. Por ejemplo, y sin que esto limite el alcance de la presente invención, la razón entre el espesor de dicho cuerpo planar (2) y la menor de sus dimensiones laterales (largo o ancho) puede ser menor que 1:3. En una realización más preferida, sin que esto limite el alcance de la presente invención, la razón entre el espesor de dicho cuerpo planar (2) y la menor de sus dimensiones laterales puede ser menor que 1:10.

Por otra parte, la forma específica de dicho cuerpo planar (2) no limita el alcance de la presente invención. Por ejemplo, como se muestra en las Figuras 1 y 2 y sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicho cuerpo planar (2) puede poseer una porción ancha y una porción angosta, de forma similar a una paleta. En dicho caso, sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicha porción ancha es la que posee la perforación pasante (3) de forma rectangular. En este caso, además y sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicha porción ancha es la que se encuentra en contacto con el medio a medir, mientras que la porción angosta actúa como una empuñadura del

sensor de conductividad que es objeto de la presente invención.

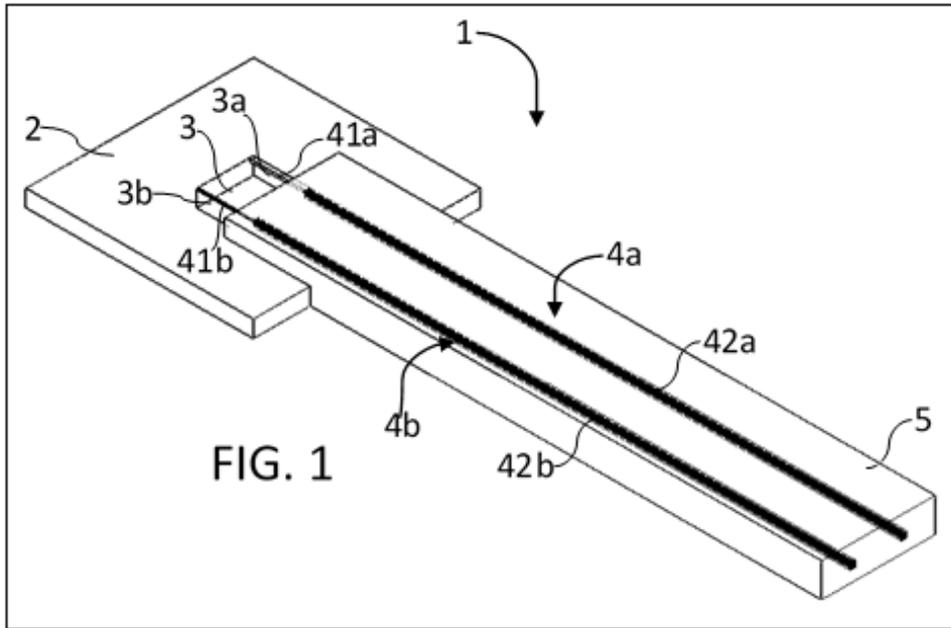


Figura A.1: Figura isométrica del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.

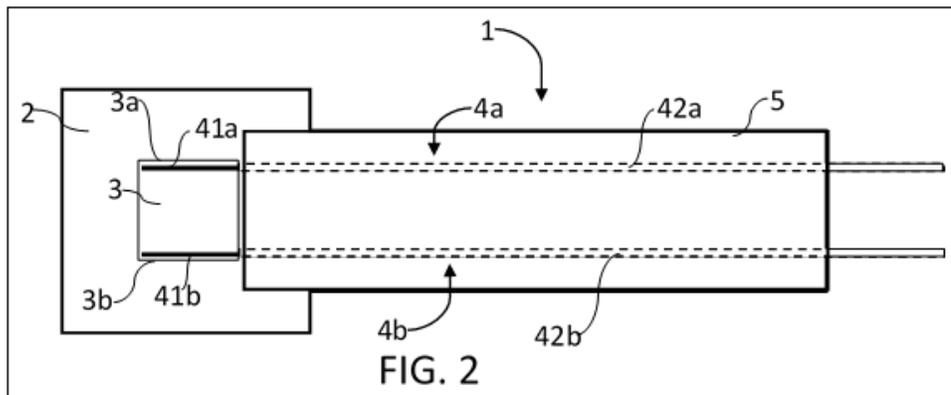


Figura A.2: Figura de la vista superior del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.

En caso de proporcionar un cuerpo planar (2) que posee una porción ancha y una porción angosta, las dimensiones de las mismas no limitan el alcance de la presente invención. Por ejemplo, y sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicha porción ancha puede poseer un ancho de entre 2,5 cm y 5 cm y una longitud de entre 3 cm y 5 cm; mientras que dicha porción angosta puede poseer un ancho de entre 1,5 cm y 3 cm y una longitud de entre 7 cm y 12 cm. Sin embargo, en otra realización preferida, puede establecerse que la totalidad de dicho cuerpo planar (2) posee dimensiones menores a un cierto valor umbral. Por ejemplo, y sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicho cuerpo planar (2) puede poseer un ancho menor a 3 cm. En otro ejemplo, sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicho cuerpo planar (2) puede poseer un

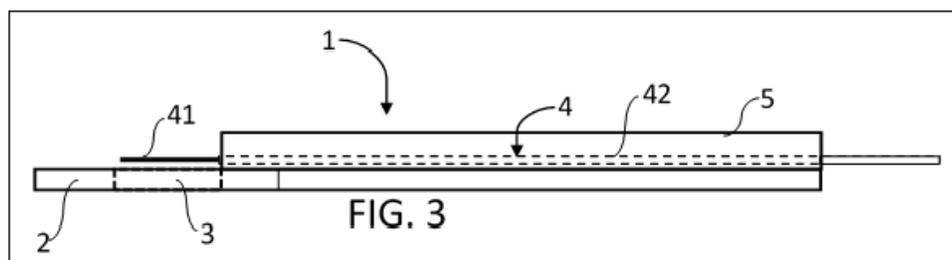


Figura A.3: Figura de la vista lateral del sensor de conductividad según consta en la descripción de la patente de invención.

largo menor a 15 cm. En aun otro ejemplo, sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicho cuerpo planar (2) puede poseer un espesor menor a 5 mm.

Adicionalmente, dicho cuerpo planar (2) está construido de un material inerte a medios salinos. Debe entenderse, en el contexto de la presente invención, que un material inerte es aquel que no reacciona con el medio en el cual se inserta, en este caso medios salinos como pueden ser, sin limitarse a estos, una solución de nutrientes o el drenaje producto de cultivos hidropónicos en el contexto de cultivos hortícolas en medios hidropónicos. Dicho material inerte a medios salinos puede seleccionarse, sin que esto limite el alcance de la presente invención, del conjunto formado por acrílico, plástico, vidrio, así como combinaciones de los mismos. Pueden utilizarse, además, otros materiales que no reaccionen o generen subproductos con el medio en el que se utiliza el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención.

Por otra parte, dicho cuerpo planar (2) posee una perforación pasante (3) cuya sección transversal posee al menos dos lados esencialmente paralelos (3a, 3b) enfrentados entre sí. Si bien las dimensiones específicas de dicha perforación pasante (3) no limitan el alcance de la presente invención, en una realización preferida, a fin de permitir una mayor compatibilidad con lectores de adquisición de datos, dicha perforación pasante (3) posee una sección transversal de forma rectangular con un área de 1 cm². En una realización más preferida, sin que esto limite el alcance de la presente invención, dicha perforación pasante (3) de forma rectangular posee una sección transversal de forma cuadrada, dicho cuadrado que posee cuatro lados de 1 cm cada uno.

El sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención comprende, además, dos electrodos metálicos (4a, 4b), fijados a dicho cuerpo planar (2). Cada uno de dichos electrodos metálicos (4a, 4b) posee una porción expuesta (41a, 41b) y una porción aislada (42a, 42b). En el contexto de la presente invención, debe entenderse que la porción expuesta (41), es aquella que, en uso, permanecerá en contacto con la muestra a medir, mientras que la porción aislada (42) es aquella que, en uso, permanece aislada de la muestra a medir.

La forma en la cual se obtengan dichas porciones expuesta (41) y aislada (42) en dichos electrodos (4) no limita el alcance de la presente invención. Por ejemplo, y sin que esto limite el alcance de la presente invención, dichos electrodos metálicos (4a, 4b) pueden ser

conductores metálicos que poseen una aislación de fábrica, de manera que puede obtenerse dicha porción expuesta (41) quitando dicha aislación a parte de dicho conductor. En otro ejemplo, sin que esto limite el alcance de la presente invención, dichos electrodos metálicos (4a, 4b) pueden ser conductores sin una aislación de fábrica y dicho cuerpo planar (2) puede poseer sendas perforaciones o canales longitudinales que permitan posicionar dichos electrodos metálicos (4a, 4b) de forma que se obtienen sendas porciones expuestas (41a, 41b) y porciones aisladas (42a, 42b). Una persona con conocimientos medios en el campo técnico correspondiente notará, sin embargo, que cualquier método que permita obtener electrodos metálicos (4) que posean una porción expuesta (41) y una porción aislada (42) es adecuado para llevar a cabo la presente invención.

Por otra parte, la forma en la cual se fijan dichos electrodos metálicos (4a, 4b) a dicho cuerpo planar (2) no limita el alcance de la presente invención. De esta manera pueden utilizarse, sin que esto limite el alcance de la presente invención, pegamentos, abrazaderas, grapas, regletas, entre otros.

En una realización preferida, sin que esto limite el alcance de la presente invención, el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención comprende un cuerpo sólido (5) que aloja las porciones aisladas (42a, 42b) de dichos electrodos (4a, 4b), obteniéndose, de este modo, la fijación de dichos electrodos (4a, 4b) a dicho cuerpo planar (2). El material específico con que se fabrique dicho cuerpo sólido (5) no limita el alcance de la presente invención, pudiendo utilizarse, entre otros, plásticos, acrílicos, vidrio, o combinaciones de los mismos. La forma específica de dicho cuerpo sólido (5) además, no limita el alcance de la presente invención y la forma en la cual se obtenga de manera efectiva la presión de las porciones aisladas (41a, 41b) de dichos electrodos (4a, 4b) contra dicho cuerpo planar (2) tampoco limita el alcance de la presente invención.

Las porciones expuestas (41a, 41b) de dichos electrodos metálicos (4a, 4b) se posicionan en los lados opuestos (3a, 3b) de la sección transversal de la perforación pasante (3) que posee el cuerpo planar (2). De esta manera, dichas porciones expuestas (41a, 41b) en conjunto con dicha perforación pasante (3) definen un volumen de medición, el que se utilizará para obtener la conductividad del medio a medir, mediante la ecuación:

$$\sigma = \left(\frac{l}{RA} \right) \quad (\text{A.1})$$

donde σ es la conductividad de la muestra, l es la distancia entre las porciones expuestas (41a, 41b) de dichos electrodos metálicos (4a, 4b), R es la resistencia medida de la muestra y A es la sección transversal del volumen definido por dichas porciones expuestas (41a, 41b) y dicha perforación pasante (3).

Dichas porciones expuestas (41a, 41b) pueden posicionarse en dichos lados (3a, 3b) de dicha perforación pasante (3) mediante cualquier método adecuado, como puede ser, sin limitarse a estos, pegamentos, rieles en dichos lados (3a, 3b), prensadoras, u otros métodos conocidos en el estado de la técnica. En algunos casos, sin que esto limite el alcance de la presente invención, no hay necesidad de un medio de posicionamiento entre dichas

porciones expuestas (41a, 41b) y dichos lados opuestos (3a, 3b) pues el mismo puede obtenerse como consecuencia de la fijación de los electrodos (4a, 4b) al cuerpo planar (2).

El material con el que se construyan dichos electrodos metálicos (4a, 4b) no limitan el alcance de la presente invención siempre que los mismos sean de un material conductor resistente a la corrosión como puede ser, sin limitarse a estos, aleaciones de acero con cromo, cobre, níquel o molibdeno; así como otras aleaciones como el bronce, o metales tales como el aluminio, el cobre o el hierro. Una persona con conocimientos medios en el campo técnico notará, sin embargo, que es posible utilizar otros materiales conductores resistentes a la corrosión en función de la aplicación específica del sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención.

En otra realización preferida, sin que esto limite el alcance de la presente invención, el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención puede comprender, adicionalmente, un sensor de temperatura (que no se ilustra en las figuras) fijado a dicho cuerpo planar (2). La presencia de dicho sensor de temperatura, de manera ventajosa, permite la compensación por temperatura de las mediciones de conductividad que se obtengan con el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención. La naturaleza de dicho sensor de temperatura no limita el alcance de la presente invención, pudiendo utilizarse, sin limitarse a estos, sensores resistivos, como por ejemplo un sensor de resistencia de platino, sensores RTD o termistores; sensores termoeléctricos, como por ejemplo termopares con o sin vaina; sensores bimetálicos, entre otros. Por otra parte, la forma en la cual se obtenga la medición de dicho sensor de temperatura no limita el alcance de la presente invención, pudiendo o no encontrarse integrado al instrumento de adquisición que se utilice con el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención.

Por otra parte, una persona con conocimientos medios en el campo técnico entenderá que las mediciones de conductividad dependen de la temperatura, por lo cual debe realizarse una compensación por temperatura de las mediciones obtenidas, a fin de obtener la medición de conductividad a una temperatura específica, típicamente 20°C. Dicha compensación puede realizarse de manera automática, en conjunto con la adquisición, o de manera “manual”, con posterioridad a la adquisición, utilizando en ambos casos un modelo matemático adecuado. En una realización preferida, sin que esto limite el alcance de la presente invención, el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención puede comprender, adicionalmente, un sensor de temperatura (que no se ilustra en las figuras) fijado a dicho cuerpo planar (2). La presencia de dicho sensor de temperatura, de manera ventajosa, permite la compensación automática por temperatura de las mediciones de conductividad que se obtengan con el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención. La naturaleza de dicho sensor de temperatura no limita el alcance de la presente invención, pudiendo utilizarse, sin limitarse a estos, sensores resistivos, como por ejemplo un sensor de resistencia de platino, sensores RTD o termistores; sensores termoeléctricos, como por ejemplo termopares con o sin vaina; sensores bimetálicos, entre otros. Por otra parte, la forma en la cual se obtenga la medición de dicho sensor de temperatura no limita el alcance de la presente invención, pudiendo o no encontrarse

integrado al instrumento de adquisición que se utilice con el sensor de conductividad (1) que es objeto de la presente invención.

De acuerdo a la descripción previamente detallada es posible obtener un sensor de conductividad (1) que resuelve el problema de proporcionar un dispositivo adecuado para su uso en medios acuosos altamente salinos, que pueda permanecer sumergido por tiempos largos sin requerir reemplazo ni calibración.

En lo sucesivo se describirán ejemplos de realización de la presente invención. Debe entenderse que los mismos se presentan solamente con una intención ilustrativa a fin de proporcionar un mejor entendimiento de la presente invención pero en ningún caso limitan el alcance de la misma.

Adicionalmente, los rangos, limitaciones o valores de las características técnicas presentadas en ejemplos diferentes pueden ser combinadas entre sí de cualquier forma posible sin que esto limite el alcance de la presente invención. Adicionalmente, dichos rangos, limitaciones o valores pueden combinarse con rangos, limitaciones o valores previamente detallados en la presente solicitud sin que esto limite el alcance de la presente invención.

A.6 Ejemplos de realización

A.6.1 Ejemplo 1: Fabricación del sensor de conductividad

Se ha fabricado un sensor de conductividad (1) que posee un cuerpo planar (2) que es una estructura de acrílico de aproximadamente 10 cm de largo, que posee una porción ancha de 3 cm de ancho y una porción angosta de 2 cm de ancho. Dicha porción ancha posee una perforación pasante (3) de forma cuadrada y un área de 1 cm². En dicho cuerpo planar (2) se fijan tanto los electrodos metálicos (4a, 4b) como un sensor de temperatura a dicho cuerpo planar. Dichos electrodos metálicos, a su vez, se conectan a un cable resistente al agua que, en el extremo opuesto, posee un conector de tipo BNC para la adquisición de datos correspondientes a la conductividad.

A.6.2 Ejemplo 2: Comparación con sensores comerciales

Se realizaron pruebas de laboratorio contrastando contra dispositivos comerciales y medios de calibración. Los datos permiten establecer una alta precisión en la medición. En la tabla A.1 se muestran algunos datos obtenidos en el laboratorio donde se logra determinar el % de error entre las mediciones realizadas con un sensor de conductividad comercial (EXtech EC500) y el sensor de conductividad fabricado de acuerdo al ejemplo anterior.

Tabla A.1: Datos comparativos entre sensor comercial y sensor de la invención

Sustancia de prueba	Extech EC500	Sensor de la Invención	% de error
1	100.2×10^{-6}	102.1×10^{-6}	1.89
2	5.77×10^{-3}	5.65×10^{-3}	2.08
3	10.49×10^{-3}	10.20×10^{-3}	2.76
4	14.52×10^{-3}	14.75×10^{-3}	1.58
5	Fuera de rango	19.9×10^{-3}	No aplica

A.6.3 Ejemplo 3: Pruebas de campo

Se realizaron pruebas de campo directamente en la solución de nutrientes utilizada en el proceso de ferti-irrigación de los cultivos en sustratos de fibra de coco en ambientes protegidos. Para determinar la durabilidad de los electrodos se sometió el sensor a pruebas de aceleración de corrosión en una cámara de aceleración salina, las muestras de cable fueron expuestas a la niebla salina por un máximo de 168 horas. Una vez finalizada la prueba en la cámara se procede a determinar la existencia de cambios significativos en las características de conductividad eléctrica. La comparación de datos antes y después de las pruebas de aceleración de corrosión no mostró cambios significativos en las características de conductividad eléctrica medidas con el sensor fabricado de acuerdo al ejemplo 1.

A.7 Reinvidicaciones

1. Un sensor de conductividad (1), CARACTERIZADO porque comprende:

- un cuerpo planar (2) que posee una perforación pasante (3), dicha perforación pasante (3) que posee una sección transversal con al menos dos lados esencialmente paralelos (3a, 3b) enfrentados entre sí; y

- dos electrodos metálicos (4a, 4b), fijados a dicho cuerpo planar (2), cada uno que posee una porción expuesta (41a, 41b) y una porción aislada (42a, 42b), en donde las porciones expuestas (41a, 41b) de dichos electrodos metálicos (4a, 4b) se posicionan en dichos lados enfrentados (3a, 3b) de dicha perforación pasante (3);

en donde dicho cuerpo planar (2) está construido de un material inerte a medios salinos; y

en donde dichos electrodos metálicos (4a, 4b) están contruidos de un material conductor resistente a la corrosión.

2. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque comprende, adicionalmente, un cuerpo sólido (5) que aloja las porciones aisladas (42a, 42b) de dichos electrodos (4a, 4b).

3. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque comprende, adicionalmente, un sensor de temperatura fijado a dicho cuerpo planar (2).
4. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque dicha perforación pasante (3) de dicho cuerpo planar (2) posee una sección transversal de forma rectangular y un área de 1 cm².
5. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 3, CARACTERIZADO porque dicha perforación pasante (3) posee una sección transversal de forma cuadrada cuyos lados tienen una longitud de 1 cm.
6. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque dicho cuerpo planar (2) posee un ancho menor a 3 cm.
7. El sensor de conductividad (1) de la reivindicación 1, CARACTERIZADO porque dicho material inerte a medios salinos es acrílico.

A.8 Resumen

La presente invención se relaciona al campo de la medición de variables eléctricas, en específico con la medición de resistencia, reactancia, impedancia o características eléctricas que se deriven de las mismas y en específico proporciona un sensor de conductividad que se caracteriza porque comprende: un cuerpo planar que posee una perforación pasante, dicha perforación pasante que posee una sección transversal con al menos dos lados esencialmente paralelos enfrentados entre sí; y dos electrodos metálicos, fijados a dicho cuerpo planar, cada uno que posee una porción expuesta y una porción aislada, en donde las porciones expuestas de dichos electrodos metálicos se posicionan en lados opuestos de dicha perforación pasante; en donde dicho cuerpo planar está construido de un material inerte a medios salinos; y en donde dichos electrodos metálicos están contruidos de un material conductor resistente a la corrosión.

De esta manera, es posible obtener un sensor de conductividad que resuelve el problema de proporcionar un dispositivo adecuado para su uso en medios acuosos altamente salinos, que pueda permanecer sumergido por tiempos largos sin requerir reemplazo ni calibración.

Apéndice B

Pruebas al controlador de lógica difusa

En este apéndice, específicamente en la tabla B.1, se muestran los resultados obtenidos para el controlador de lógica difusa tomando en consideración algunos puntos críticos de las funciones de pertenencia de las entradas. La evaluación consistió en el uso del software QtFuzzyLite 6 para probar las entradas de drenaje, CE y pH. El fertirriego es la condición de salida del controlador borroso. En los resultados se evidencia que a menor disponibilidad de agua mayor son los requerimientos de riego, según fue establecido por el criterio de experto [12].

En conclusion, se ha validado el cumplimiento del criterio de experto en los puntos críticos del controlador borroso, así como en otros puntos de relevancia en la toma de decisiones. La cantidad de escenarios seleccionados para las pruebas son suficientemente representativos para la validación del controlador borroso.

Tabla B.1: Pruebas al controlador de lógica difusa en puntos críticos de toma de decisión

Drenaje	Conductividad	pH	Fertirriego
0.627AMDD	0.5 Baja 0.5 Buena Punto crítico	0.680 Ligeramente ácido	0.627 Abundante
0.240 AMDD 0.260 ADD Punto crítico	1 Buena	1 Ideal	0.260 Normal
0.573 ADD	1 Buena	0.2 Ideal 0.2 Ligeramente alcalino Punto crítico	0.573 Normal
0.260 ADD 0.240 AFD Punto crítico	0.810 Buena 0.190 Alta	1 Ligeramente alcalino	0.240 Poco
0.640 AFD	0.5 Buena 0.5 Alta Punto crítico	0.320 Ligeramente alcalino 0.080 Muy alcalino	0.640 Poco
0.247 AFD 0.253 AMFD Punto crítico	1 Alta	1 Muy alcalina	0.253 No riego
0.5 AFD	1 Buena	1 Ideal	0.50 Poco
0.571 AMFD	1 Baja	1 Ligeramente ácido	0.571 No riego
0.473 AMDD	1 Buena	1 Ligeramente alcalino	0.473 Abundante

Apéndice C

Código del controlador del lógica difusa

En este apéndice se detallan en su totalidad el código en C del controlador de lógica difusa eFLL, se han incorporado comentarios y la definición de cada una de las variables de entrada y salida. Primeramente se inicializa el controlador, posteriormente se crean las entradas y salidas considerando la formas trapezoidales y triangulares establecidas para cada una. Se han considerado seis reglas de lógica difusa en el controlador autónomo eFLL.

```
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

int n=0;
int i=0;

//Data for quick test

//pH
float var1[14] =
{0.186,0.005,0.095,0.363,0.384,0.401,0.406,0.421,0.549,
 0.504,0.527,0.839,0.915,0.935};

//conductividad
float var2[14] =
{0.938,0.723,0.732,0.757,0.742,0.496,0.470,0.442,0.268,
 0.020,0.201,0.121n,0.045,0.213};
```

```
//drenaje
float var3[14] =
{0.926,0.955,0.893,0.663,0.617,0.477,0.535,0.710,0.431,
 0.474,0.392,0.193,0.245,0.089};

//pH
FuzzySet* muy_acido = new FuzzySet(0, 0.025, 0.175, 0.2);
FuzzySet* ligeramente_acido =
    new FuzzySet(0.190, 0.215, 0.365, 0.390);
FuzzySet* ideal = new FuzzySet(0.380, 0.405, 0.555, 0.580);
FuzzySet* ligeramente_alcalino =
    new FuzzySet(0.570, 0.595,0.745, 0.770);
FuzzySet* muy_alcalino =
    new FuzzySet(0.760, 0.785, 0.935, 0.960);

//conductividad
FuzzySet* baja = new FuzzySet(0, 0.1, 0.3, 0.4);
FuzzySet* buena = new FuzzySet(0.3, 0.4, 0.6, 0.7);
FuzzySet* alta = new FuzzySet(0.6, 0.7, 0.9, 1.00);

//drenaje
FuzzySet* agua_muy_dificilmente_disponible =
    new FuzzySet(0,0.150, 0.150, 0.300);
FuzzySet* agua_dificilmente_disponible =
    new FuzzySet(0.225, 0.375, 0.375, 0.525);
FuzzySet* agua_facilmente_disponible =
    new FuzzySet(0.450, 0.600, 0.600, 0.750);
FuzzySet* agua_muy_facilmente_disponible =
    new FuzzySet(0.675, 0.825, 0.825, 1.00);

void setup(){
Serial.begin(9600);

// FuzzyInput --- pH ---
FuzzyInput* pH = new FuzzyInput(1);
pH->addFuzzySet(muy_acido);
pH->addFuzzySet(ligeramente_acido);
pH->addFuzzySet(ideal);
pH->addFuzzySet(ligeramente_alcalino);
pH->addFuzzySet(muy_alcalino);

fuzzy->addFuzzyInput(pH);

// FuzzyInput --- Conductividad ---
FuzzyInput* conductividad = new FuzzyInput(2);
conductividad->addFuzzySet(baja);
conductividad->addFuzzySet(buena);
conductividad->addFuzzySet(alta);

fuzzy->addFuzzyInput(conductividad);
```

```

// FuzzyInput --- Drenaje ---
FuzzyInput* drenaje = new FuzzyInput(3);
drenaje->addFuzzySet(agua_muy_dificilmente_disponible);
drenaje->addFuzzySet(agua_dificilmente_disponible);
drenaje->addFuzzySet(agua_facilmente_disponible);
drenaje->addFuzzySet(agua_muy_facilmente_disponible);

fuzzy->addFuzzyInput(drenaje);

// FuzzyOutput --- Riego ---
FuzzyOutput* riego = new FuzzyOutput(1);

FuzzySet* no_riego = new FuzzySet(0, 0.2, 0.2, 0.375);
riego->addFuzzySet(no_riego);
FuzzySet* riego_poco = new FuzzySet(0.225, 0.4, 0.4, 0.575);
riego->addFuzzySet(riego_poco);
FuzzySet* riego_normal = new FuzzySet(0.425, 0.6, 0.6, 0.775);
riego->addFuzzySet(riego_normal);
FuzzySet* riego_abundante = new FuzzySet(0.625, 0.80, 0.80, 1);
riego->addFuzzySet(riego_abundante);

fuzzy->addFuzzyOutput(riego);

//-----Definicion de reglas-----

//===== Regla 1=====
//ENTRADAS
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible
//          *-AND-* Conductividad baja
// *-OR-*
// Drenaje con agua muy dificilmente disponible
//          *-AND-* Conductividad baja
//          *-AND-* pH muy alcalino
//
// SALIDA
// Riego abundante
// =====

FuzzyRuleAntecedent* drenaje_amdd = new FuzzyRuleAntecedent();
drenaje_amdd->joinSingle(agua_muy_dificilmente_disponible);

FuzzyRuleAntecedent* ph_muy_alcalino =
    newFuzzyRuleAntecedent();
ph_muy_alcalino->joinSingle(muy_alcalino);

FuzzyRuleAntecedent* conductividad_baja =
    newFuzzyRuleAntecedent();
conductividad_baja->joinSingle(baja);

```

```

FuzzyRuleAntecedent* x1 = new FuzzyRuleAntecedent ();
x1->joinWithAND(drenaje_amdd, conductividad_baja);

FuzzyRuleAntecedent* x2 = new FuzzyRuleAntecedent ();
x2->joinWithAND(x1, ph_muy_alcalino);

// Agua muy dificilmente disponible
// *OR*
// Agua muy dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
FuzzyRuleAntecedent* x3 = new FuzzyRuleAntecedent ();
x3->joinWithOR(drenaje_amdd, x1);

// Agua muy dificilmente disponible
// *OR*
// Agua muy dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
// *OR*
// Agua muy dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
//
//                                *AND* pH muy alcalino
FuzzyRuleAntecedent* if_amdd = new FuzzyRuleAntecedent ();
if_amdd->joinWithOR(x3, x2);

FuzzyRuleConsequent* then_riego_abundante =
    new FuzzyRuleConsequent ();
then_riego_abundante->addOutput(riego_abundante);

FuzzyRule* fuzzyRule1 =
    new FuzzyRule(1, if_amdd, then_riego_abundante);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

//===== Regla 2=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua dificilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua dificilmente disponible
//
//                *-AND-* Conductividad baja
// *-OR-*
// Drenaje con agua dificilmente disponible
//
//                *-AND-* Conductividad baja
//
//                *-AND-* pH ligeramente alcalino
// SALIDA
// Riego normal
//=====
FuzzyRuleAntecedent* drenaje_add = new FuzzyRuleAntecedent ();
drenaje_add->joinSingle(agua_dificilmente_disponible);

FuzzyRuleAntecedent* ph_ligeramente_alcalino =
    new FuzzyRuleAntecedent ();
ph_ligeramente_alcalino->joinSingle(ligeramente_alcalino);

// conductividad_baja-> antecedente definido anteriormente
FuzzyRuleAntecedent* y1 = new FuzzyRuleAntecedent ();

```

```

y1->joinWithAND(drenaje_add, conductividad_baja);

FuzzyRuleAntecedent* y2 = new FuzzyRuleAntecedent();
y2->joinWithAND(y1, ph_ligeramente_alcalino);

// Agua dificilmente disponible
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
FuzzyRuleAntecedent* y3 = new FuzzyRuleAntecedent();
y3->joinWithOR(drenaje_add, y1);

// Agua dificilmente disponible
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad Baja
//                               *AND* pH ligeramente alcalino
FuzzyRuleAntecedent* if_add = new FuzzyRuleAntecedent();
if_add->joinWithOR(y3, y2);

FuzzyRuleConsequent* then_riego_normal =
    new FuzzyRuleConsequent();
then_riego_normal->addOutput(riego_normal);

FuzzyRule* fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, if_add,
then_riego_normal);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);

//===== Regla 3=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua facilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad buena
// *-OR-*
// Drenaje con agua facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad buena
//                               *-AND-* pH ideal
// SALIDA
// Riego normal
//=====
FuzzyRuleAntecedent* drenaje_afd = new FuzzyRuleAntecedent();
drenaje_afd->joinSingle(agua_facilmente_disponible);

FuzzyRuleAntecedent* ph_ideal = new FuzzyRuleAntecedent();
ph_ideal->joinSingle(ideal);

FuzzyRuleAntecedent* conductividad_buena =
    new FuzzyRuleAntecedent();
conductividad_buena->joinSingle(buena);

```

```

FuzzyRuleAntecedent* z1 = new FuzzyRuleAntecedent ();
z1->joinWithAND(drenaje_afd, conductividad_buena);

FuzzyRuleAntecedent* z2 = new FuzzyRuleAntecedent ();
z2->joinWithAND(z1, ph_ideal);

// Agua facilmente disponible
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad buena
FuzzyRuleAntecedent* z3 = new FuzzyRuleAntecedent ();
z3->joinWithOR(drenaje_afd,z1);

// Agua facilmente disponible
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad buena
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad Buena
//
//                               *AND* pH ideal
FuzzyRuleAntecedent* if_afd = new FuzzyRuleAntecedent ();
if_afd->joinWithOR(z3, z2);

// then_riego_normal-> consecuencia definida con anterioridad
then_riego_normal->addOutput(riego_normal);

FuzzyRule* fuzzyRule3 =
    new FuzzyRule(3, if_afd,then_riego_normal);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule3);

//===== Regla 4=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua dificilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua dificilmente disponible
//
//                               *-AND-* Conductividad buena
// *-OR-*
// Drenaje con agua dificilmente disponible
//
//                               *-AND-* Conductividad buena
//
//                               *-AND-* pH ideal
// SALIDA
// Riego poco
//=====

// drenaje_add-> definido anteriormente
// ph_ideal-> definido anteriormente
// conductividad_buena-> definido anteriormente

FuzzyRuleAntecedent* w1 = new FuzzyRuleAntecedent ();
w1->joinWithAND(drenaje_add, conductividad_buena);

FuzzyRuleAntecedent* w2 = new FuzzyRuleAntecedent ();
w2->joinWithAND(w1, ph_ideal);

```

```

// Agua dificilmente disponible
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad buena
FuzzyRuleAntecedent* w3 = new FuzzyRuleAntecedent ();
w3->joinWithOR(drenaje_add,w1);

// Agua dificilmente disponible
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad buena
// *OR*
// Agua dificilmente disponible *AND* Conductividad buena
//                               *AND* pH ideal
FuzzyRuleAntecedent* if_add2 = new FuzzyRuleAntecedent ();
if_add2->joinWithOR(w3, w2);

FuzzyRuleConsequent* then_riego_poco =
    new FuzzyRuleConsequent ();
then_riego_poco->addOutput(riego_poco);

FuzzyRule* fuzzyRule4 =
    new FuzzyRule(4, if_add2, then_riego_poco);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule4);

//===== Regla 5=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua facilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad alta
// *-OR-*
// Drenaje con agua facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad alta
//                               *-AND-* pH acido
//
// SALIDA
// Riego poco
//=====

// drenaje_afd-> antecedente definido anteriormente

FuzzyRuleAntecedent* ph_ligeramente_acido =
    new FuzzyRuleAntecedent ();
ph_ligeramente_acido->joinSingle(ligeramente_acido);

FuzzyRuleAntecedent* conductividad_alta =
    new FuzzyRuleAntecedent ();
conductividad_alta->joinSingle(alta);

FuzzyRuleAntecedent* t1 = new FuzzyRuleAntecedent ();
t1->joinWithAND(drenaje_afd, conductividad_alta);

```

```

FuzzyRuleAntecedent* t2 = new FuzzyRuleAntecedent();
t2->joinWithAND(t1, ph_ligeramente_acido);

// Agua facilmente disponible
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad alta
FuzzyRuleAntecedent* t3 = new FuzzyRuleAntecedent();
t3->joinWithOR(drenaje_afd, t1);

// Agua facilmente disponible
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad alta
// *OR*
// Agua facilmente disponible *AND* Conductividad alta
//                               *AND* pH ligeramente acido
FuzzyRuleAntecedent* if_afd2 = new FuzzyRuleAntecedent();
if_afd2->joinWithOR(t3, t2);

// then_riego_poco-> consecuencia definida con anterioridad
then_riego_poco->addOutput(riego_poco);

FuzzyRule* fuzzyRule5 =
    new FuzzyRule(5, if_afd2, then_riego_poco);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule5);

//===== Regla 6=====
// ENTRADAS
// Drenaje con agua muy facilmente disponible
// *-OR-*
// Drenaje con agua muy facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad alta
// *-OR-*
// Drenaje con agua muy facilmente disponible
//                               *-AND-* Conductividad alta
//                               *-AND-* pH muy acido
//
// SALIDA
// No riego
//=====

FuzzyRuleAntecedent* drenaje_amfd = new FuzzyRuleAntecedent();
drenaje_amfd-> joinSingle(agua_muy_facilmente_disponible);

FuzzyRuleAntecedent* ph_muy_acido = new FuzzyRuleAntecedent();
ph_muy_acido->joinSingle(muy_acido);

// conductividad_alta-> antecedente definido con anterioridad
FuzzyRuleAntecedent* r1 = new FuzzyRuleAntecedent();
r1->joinWithAND(drenaje_amfd, conductividad_alta);

FuzzyRuleAntecedent* r2 = new FuzzyRuleAntecedent();
r2->joinWithAND(r1, ph_muy_acido);

```

```
// Agua muy facilmente disponible
// *OR*
// Agua muy facilmente disponible *AND* Conductividad alta
FuzzyRuleAntecedent* r3 = new FuzzyRuleAntecedent ();
r3->joinWithOR(drenaje_amfd, r1);

// Agua muy facilmente disponible
// *OR*
// Agua muy facilmente disponible *AND* Conductividad alta
// *OR*
// Agua muy facilmente disponible *AND* Conductividad alta
//
// *AND* pH muy

FuzzyRuleAntecedent* if_amfd = new FuzzyRuleAntecedent ();
if_amfd->joinWithOR(r3, r2);

FuzzyRuleConsequent* then_no_riego = new FuzzyRuleConsequent ();
then_no_riego->addOutput(no_riego);

FuzzyRule* fuzzyRule6 = new FuzzyRule(6, if_amfd,
then_no_riego);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule6);

}

void loop() {
Serial.println("-----");
Serial.println(n+1);
Serial.println("-----");
fuzzy->setInput(1, var1[n]); // pH
fuzzy->setInput(2, var2[n]); // Conductividad
fuzzy->setInput(3, var3[n]); // Drenaje

fuzzy->fuzzify();

Serial.println("pH: ");
Serial.println(muy_acido->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(ligeramente_acido->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(ideal->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(ligeramente_alcalino->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(muy_alcalino->getPertinence());

Serial.println("Conductividad: ");
Serial.println(baja->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(buena->getPertinence());
Serial.print(", ");
```

```
Serial.println(alta->getPertinence());

Serial.println("Drenaje: ");

Serial.println(agua_muy_difícilmente_disponible->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(agua_difícilmente_disponible->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(agua_facilmente_disponible->getPertinence());
Serial.print(", ");

Serial.println(agua_muy_facilmente_disponible->getPertinence());

float output1 = fuzzy->defuzzify(1);
Serial.println("Salida de Riego: ");
Serial.println(output1);

n=n+1;

if(n==14) {

delay(1000);

Serial.end();
}
delay(3000);
}
```