



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE  
INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS**

**TRABAJO TERMINAL**

***“AUTOMATIZACIÓN DE LA IRRIGACIÓN DE UN  
SISTEMA HIDROPÓNICO NFT”***

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTA:**

Esteban Guerrero de la Rosa.

**Asesores:**

M. en C. Verónica Ávila Vázquez.

Dr. Alfredo Lara Herrera.

M.I. Felipe Iturriaga Cortés.



**Zacatecas, Zac., Enero de 2018.**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

CAMPUS ZACATECAS

CURRICULAR

## “AUTOMATIZACIÓN DE LA IRRIGACIÓN DE UN SISTEMA HIDROPÓNICO NFT”

Asesora.  
M. en C. Verónica Ávila Vázquez.

Asesor.  
Dr. Alfredo Lara Herrera.

Asesor.  
M.I. Felipe Iturriaga Cortés.

Presidente de Jurado.  
M. en C. Fernando Olivera Domingo

Titular.  
Dr. Miguel Fernando Delgado Pámanes.

Alumno.  
Esteban Guerrero de la Rosa.



## **Autorización de uso de obra**

### **Instituto Politécnico Nacional P r e s e n t e**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Esteban Guerrero de la Rosa estudiante del programa de Ingeniería Mecatrónica, con numero de boleta 2013670073, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada: ***"Automatización de la irrigación de un sistema hidropónico NFT"***, en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales "El Trabajo de Titulación" por un periodo indefinido contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 16 de mayo del 2019.

**Atentamente**



---

**Nombre y firma del alumno**

---

## AGRADECIMIENTOS:

*A mis padres, que no solo me mostraron el camino, sino que lo caminaron de mi lado con todo el pesar que eso representó; el consejo, el amor y el cariño estuvieron siempre allí para sacarme adelante, a ellos todo lo que soy y lo que tengo.*

*A mis hermanos y sobrino, que de alguna u otra forma estuvieron siempre allí estos últimos años de mi vida, y sobre todo, a mi hermano César, ingeniero también, que sé que desde arriba estuvo siempre velando para que mis metas se fueran cumpliendo.*

*A la maestra Vero que confió en mi cuando las cosas se pusieron difíciles, y siempre estuvo allí no solo como maestra si no como ser humano para sacar este proyecto adelante.*

*Al Dr. Alfredo, por su total atención e interés en el proyecto desde el primer momento, gran agrónomo del cual me llevo valiosas enseñanzas para mis futuros emprendimientos en el tema hidropónico.*

*A Felipe, que siempre me brindó una sonrisa, un consejo y hasta a veces un dulce, pero sobre todo apoyo incondicional desinteresado en mi trayectoria escolar, a él toda mi gratitud.*

*Finalmente, a mis compañeros, que hicieron de esta travesía universitaria, la aventura más grata de mi vida.*

---

## ÍNDICE DE CONTENIDO:

ÍNDICE DE FIGURAS:	7
ÍNDICE DE TABLAS:	9
RESUMEN:	10
ABSTRACT:	10
PALABRAS CLAVE:	11
KEYWORDS:	11
<b>1. OBJETIVOS</b>	12
1.1 OBJETIVO GENERAL:	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	12
<b>2. JUSTIFICACIÓN:</b>	13
<b>3. ESTADO DEL ARTE:</b>	14
<b>4. MARCO TEÓRICO:</b>	16
4.1 HIDROPONÍA:	16
4.1.1 NUTRIENTES:	16
4.2.2 TÉCNICAS:	17
4.2.2.1 SUSTRATOS:	17
4.2.2.2 RAÍZ FLOTANTE:	17
4.2.2.3 AEROPONÍA:	18
4.2.2.4 NFT:	18
4.2.2.4.1 VENTAJAS DEL NFT:	23
4.2 PH:	23
4.2.1 REGULACIÓN DE pH:	25
4.2.2 MEDICIÓN DEL pH:	25
4.3 ÁCIDOS Y BASES:	27
4.3.1 ÁCIDOS Y BASES EMPLEADOS EN LOS CULTIVOS HIDROPÓNICOS:	27
4.4 LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:	27
4.4.1 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD:	28
4.5 CONTROL:	29
4.5.1 TIPOS DE CONTROL:	31
4.5.1.1 CONTROL ADAPTIVO:	31
4.5.1.2 CONTROL ROBUSTO:	32
4.5.1.3 CONTROL DIFUSO:	32
4.5.1.3.1 FUZZIFICACIÓN:	33
4.5.1.3.2 INFERENCIA DIFUSA:	34
4.5.1.3.3 DEFUZZIFICACIÓN:	35
4.6 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS:	36
4.6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS:	36
4.6.2 PLC:	38

4.6.3 MICROCONTROLADORES.....	39
4.7 BOMBAS:.....	40
4.7.1 BOMBAS PERISTÁLTICAS:.....	41
4.8 ETAPA DE POTENCIA: .....	42
4.9 INTERFAZ GRÁFICA: .....	43
4.9.1 LABVIEW: .....	44
<b>5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: .....</b>	<b>45</b>
<b>6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN:.....</b>	<b>48</b>
6.1 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL SISTEMA NFT:.....	48
6.1.2 TAMAÑO DEL CULTIVO: .....	48
6.1.3 SOLUCIÓN NUTRITIVA:.....	49
6.1.4 ÁCIDO Y BASE:.....	49
6.1.5 MATERIALES:.....	49
6.1.5.1 CANALES: .....	49
6.1.5.2 CONTENEDORES:.....	51
6.1.5.3 ESTRUCTURA BASE: .....	51
6.2  SENSORES:.....	54
6.2.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE CONDUCTIVIDAD:.....	55
6.2.2 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE CONDUCTIVIDAD: .....	56
6.2.3 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE PH: .....	57
6.2.4 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE pH: .....	57
6.2.3 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE NIVEL:.....	58
6.2.5 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE NIVEL: .....	59
6.3  BOMBA:.....	59
6.3.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE BOMBAS: .....	60
6.3.2 SELECCIÓN DE BOMBA: .....	60
6.3.3 BOMBA PARA AGITAR: .....	61
6.4  BOMBAS PERISTÁLTICAS: .....	61
6.5.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE BOMBAS PERISTÁLTICAS: .....	63
6.4.2 SELECCIÓN DE LA BOMBA PERISTÁLTICA: .....	64
6.5  FUENTE DE ALIMENTACIÓN: .....	64
6.6  TARJETA DE ADQUISICIÓN:.....	65
6.7  ETAPA DE POTENCIA: .....	66
6.8.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE PUENTE H: .....	67
6.7.2 SELECCIÓN DE PUENTE H: .....	67
6.8  INTERFAZ GRÁFICA:.....	68
6.9  COMUNICACIÓN A DISTANCIA: .....	68
6.10.1 ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN:.....	69
6.9.2 SELECCIÓN DE LA COMUNICACIÓN A ADOPTAR:.....	69
<b>7. DESARROLLO: .....</b>	<b>71</b>
7.1  ENSAYOS CON LOTES DE LECHUGA: .....	71
7.1.1 PRIMER ENSAYO:.....	72
7.1.2 SEGUNDO ENSAYO:.....	76
7.1.3 TERCER ENSAYO: .....	79

---

7.2	DISEÑO DEL CONTROLADOR: .....	84
7.2.1	VARIABLES DEL SISTEMA: .....	85
7.2.1.1	NIVEL: .....	86
7.2.1.2	CONDUCTIVIDAD: .....	87
7.2.1.3	pH: .....	87
7.2.1.4	REPOSICION DE AGUA: .....	88
7.2.1.5	ACIDO A AGREGAR: .....	89
7.2.2	REGLAS: .....	90
7.2.3	SIMULACIÓN: .....	97
7.2.4	PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DIFUSO: .....	100
7.3	RIEGOS: .....	103
7.3.1	PROGRAMACIÓN DE TEMPORIZADOR: .....	104
7.4	ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES: .....	105
7.4.1	PROGRAMACIÓN: .....	107
7.5	MONITOREO Y REGISTRO DE VARIABLES: .....	108
7.5.1	PROGRAMACIÓN: .....	109
7.6	CONTROL DIFUSO: .....	110
7.6.1	PROGRAMACIÓN: .....	110
7.7	COMUNICACIÓN A DISTANCIA: .....	112
8.	PRUEBAS: .....	113
9.	CONCLUSIONES: .....	116
10.	TRABAJOS FUTUROS: .....	116
11.	REFERENCIAS: .....	118
	ANEXOS: .....	121
	ANEXO A: BOCETO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA NFT .....	121
	ANEXO B: DIMENSIONES DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA: .....	122
	ANEXO C: DIAGRAMA ELÉCTRICO .....	123

---

## ÍNDICE DE FIGURAS:

FIGURA 1: SUSTRATOS EMPLEADOS HIDROPONÍA [6].	17
FIGURA 2: TÉCNICA DE RAÍZ FLOTANTE [6].	18
FIGURA 3: TÉCNICA DE AEROPONÍA [6].	18
FIGURA 4: ESQUEMA BÁSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA NFT [6].	19
FIGURA 5: SISTEMA HIDROPÓNICO NFT[6].	20
FIGURA 6: CONFIGURACIÓN VERTICAL Y PIRAMIDAL DEL SISTEMA NFT[6].	20
FIGURA 7: RECORRIDO DEL AGUA EN EL SISTEMA NFT[31].	21
FIGURA 8: CONFIGURACIÓN ZIGZAG APROVECHANDO MÁS ESPACIO [6].	22
FIGURA 9: CONFIGURACIÓN ESPIRAL DEL SISTEMA NFT[6].	22
FIGURA 10: ESTRUCTURA ELECTRODO DE PH [9].	26
FIGURA 11: ELECTRODO DE CONDUCTIVIDAD [13].	29
FIGURA 12: REPRESENTACIÓN BÁSICA GENERAL DE UN SISTEMA[15].	29
FIGURA 13: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO [11].	30
FIGURA 14: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO [16].	30
FIGURA 15: ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA DIFUSO.	33
FIGURA 16: FUNCIONES DE MEMBRESÍA STANDARD UTILIZADAS EN SISTEMAS DIFUSOS.	34
FIGURA 17: ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA DAQ[21].	37
FIGURA 18: ESTRUCTURA BÁSICA DE UN PLC [22].	38
FIGURA 19: ESTRUCTURA GENERAL DE UN MICROCONTROLADOR[23].	39
FIGURA 20: DIAGRAMA GENERAL DE UNA BOMBA DE AGUA [24].	40
FIGURA 21: BOMBA COMERCIAL DESARMADA [26].	41
FIGURA 22: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA PERISTÁLTICA[27].	42
FIGURA 23: MOTOR CONTROLADO POR TRANSISTOR.	42
FIGURA 24: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN PUENTE H[28].	43
FIGURA 25: COMPORTAMIENTO DEL PH[30].	46
FIGURA 26: DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA.	47
FIGURA 27: PVC COMERCIAL ESPECIALIZADO [6].	50
FIGURA 28: VISTA FRONTAL DE LA ESTRUCTURA Y DE LAS FUERZAS PRESENTES.	52
FIGURA 29: ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA.	53
FIGURA 30: ANÁLISIS DE FACTOR DE SEGURIDAD.	54
FIGURA 31: MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA.	66
FIGURA 32: BOSQUEJO GENERAL DE LA INTERCONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA.	70
FIGURA 33: PROTOTIPO DE SISTEMA NFT CONSTRUIDO.	72
FIGURA 34: SISTEMA NFT IMPLANTADO DENTRO DE LAS INSTALACIONES DE LA UPIIZ.	73
FIGURA 35: SISTEMA TRANSPORTADO A UNA VENTANA EN BUSCA DE LUZ SOLAR.	73
FIGURA 36: PLÁNTULA CON CRECIMIENTO ANORMAL.	74
FIGURA 37: RAÍZ DE LA PLÁNTULA CON INDICIOS DE PROBLEMAS.	75
FIGURA 38: ETIOLACIÓN PRESENTADA EN EL PRIMER LOTE SEMBRADO EN FOAMI.	76
FIGURA 39: DESARROLLO DE LA PLÁNTULA A LO LARGO DE UN MES.	78
FIGURA 40: PLÁNTULA CON RAÍZ PRÁCTICAMENTE INEXISTENTE.	78
FIGURA 41: DIA DEL TRANSPLANTE.	80
FIGURA 42: DESARROLLO DE LAS PLANTAS DOS SEMANAS DESPUÉS DEL TRASPLANTE.	80
FIGURA 43: DESARROLLO DE LAS PLANTAS 3 SEMANAS DESPUÉS DEL TRASPLANTE.	81



---

FIGURA 44: DESARROLLO ANTES DE LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS ADVERSAS .....	82
FIGURA 45: PLANTA DESPUÉS DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS .....	82
FIGURA 46: RAICES AFECTADAS POR LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....	83
FIGURA 47: FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL NIVEL DE LA SOLUCION NUTRITIVAS.....	86
FIGURA 48:FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	87
FIGURA 49: FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL PH.....	88
FIGURA 50: FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA LA REPOSICIÓN DE AGUA .....	89
FIGURA 51: FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA LA BOMBA DE ACIDO .....	89
FIGURA 52: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN PH-NIVEL-ÁCIDO.....	97
FIGURA 53: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN PH-NIVEL-AGUA .....	97
FIGURA 54: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN CE-NIVEL-ÁCIDO .....	98
FIGURA 55: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN CE-NIVEL-AGUA .....	98
FIGURA 56: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN CE-PH-AGUA.....	99
FIGURA 57: SUPERFICIE DE CONTROL DE LA RELACIÓN CE-PH-ÁCIDO .....	99
FIGURA 58: VISTA GENERAL DEL PROGRAMA DE LA CREACIÓN DEL SISTEMA DIFUSO.....	100
FIGURA 59: EJEMPLO DE CREACIÓN DE LA VARIABLE NIVEL PARA EL SISTEMA DIFUSO .....	101
FIGURA 60: EJEMPLO DE CREACIÓN DE UNA REGLA DE CONTROL DEL SISTEMA DIFUSO.....	103
FIGURA 61: PROGRAMA DE TEMPORIZACIÓN DE LOS RIEGOS.....	104
FIGURA 62: RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA MEDIDA AL SN Y LOS LITROS. ....	105
FIGURA 63:RELACION ENTRE CE DE LA SN Y EL VOLTAJE.....	106
FIGURA 64: RELACION ENTRE PH DE LA SN Y EL VOLTAJE .....	107
FIGURA 65: ADAPTACIÓN DE LOS SENSORES A LAS ESCALAS REQUERIDAS .....	108
FIGURA 66: PANEL FRONTAL DEL SISTEMA DE MONITOREO .....	109
FIGURA 67: CÓDIGO DEL DESPLIEGUE DE DATOS EN EL INSTRUMENTO VIRTUAL .....	110
FIGURA 68: VISTA GENERAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DIFUSO DENTRO DEL PROGRAMA .....	111
FIGURA 69: COMPORTAMIENTO DE LA CE ANTE EL CONTROLADOR.....	112
FIGURA 70: COMPORTAMIENTO DEL PH ANTE EL CONTROLADOR.....	113

---

## ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 1: ESCALA DE pH.....	24
TABLA 2: CONECTORES UTILIZADOS EN LA INFERENCIA DIFUSA .....	35
TABLA 3: MÉTODOS DE DEFUZZIFICACIÓN MÁS COMUNES.....	36
TABLA 4: CÁLCULO DE FUERZAS EN LA ESTRUCTURA .....	52
TABLA 5: COMPARATIVA DE SENSORES DE CONDUCTIVIDAD .....	55
TABLA 6: COMPARATIVA DE SENSORES DE pH.....	57
TABLA 7: COMPARATIVA DE SENSORES DE NIVEL .....	58
TABLA 8: COMPARATIVA DE BOMBAS .....	60
TABLA 9: COMPORTAMIENTO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA CON 10L A 2mS CON UN pH INICIAL DE 8.02 AL AGREGARLE ÁCIDO SULFÚRICO A 1 MOLAR .....	62
TABLA 10: COMPARATIVA BOMBAS PERISTÁLTICAS .....	63
TABLA 11: CÁLCULO DE LA POTENCIA NOMINAL CONSUMIDA .....	64
TABLA 12: COMPARATIVA DE PUENTE H DISPONIBLES .....	67
TABLA 13: COMPARATIVA DE COMUNICACIÓN A DISTANCIA .....	69
TABLA 14: COMPONENTES DE LA SN PARA EL TERCER ENSAYO.....	79
TABLA 15: REGLAS DE CONTROL INFERIDAS DE LOS ESTUDIOS .....	90

---

## **RESUMEN:**

La hidroponía es una técnica de cultivo muy utilizada hoy en día para la producción de casi cualquier tipo de hortaliza. Su principio se basa en la sustitución del suelo como principal proveedor de nutrientes a la planta, por agua con una solución de minerales necesarios para el cultivo. Esta sustitución implica que el agua cumpla ciertas características que el cultivo tendría normalmente en el suelo, como la alcalinidad y la concentración de nutrientes, en hidroponía estos parámetros están dados por el pH y por la CE respectivamente. El principal desafío que enfrenta este método de cultivo es la necesidad imperativa de una revisión y regulación constante por el agricultor, tanto del pH, como de la CE para garantizar los requerimientos del cultivo, y lograr su óptimo desarrollo. El presente trabajo se enfoca en el control del pH y la CE del agua, y su aplicación en la técnica hidropónica de película de nutriente (NFT), se dejan de lado otras variables propias del cultivo como la temperatura y la irradiación solar. Se analizan los diferentes tipos de control aplicables al sistema, métodos de actuación, sensado y control, que permitan tener un sistema de autorregulación de pH y CE de un cultivo NFT doméstico que reduzca la intervención humana al mínimo.

## **ABSTRACT:**

Hydroponics is a farming technique widely used today for the production of almost any kind of vegetable. Hydroponics is based on replacing soil as main supplier of plant nutrients, by a water solution with minerals needed by the culture. This substitution implies that the water must have properties that would have normally growing in the ground, such as the alkalinity and the concentration of nutrients, respectively, in hydroponics these parameters are given by the pH and electrical conductivity. The main challenge for this cropping method is the imperative need for constant check and regulation by the farmer of both, pH and electrical conductivity, to guarantee crop requirements, and achieve their optimal development. This work focuses on the study of

---

hydroponics, pH and electrical conductivity control of water and its application in film technique nutrient (NFT), leaving aside other crop variables such as temperature and insolation. The different types of control applicable to the system are analyzed, and the methods of acting, sensing and control, to be able to develop a system of pH and electrical conductivity self-regulation that reduces human intervention and improve crop quality.

**PALABRAS CLAVE:**

Hidroponía, control, pH, conductividad eléctrica, agricultura, automatización, IHM, NFT.

**KEYWORDS:**

Hydroponics, control, electrical conductivity, agriculture, automatization, HMI, NFT.

---

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL:

Diseñar y construir un sistema hidropónico de uso doméstico, que monitoree y controle las condiciones nutrimentales y de pH de la solución nutritiva en la técnica de película nutritiva (NFT) empleando lechuga como cultivo de prueba.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Generar la cantidad de mezcla de agua, nutriente, y base o ácido necesaria para satisfacer las necesidades del cultivo.
- Monitorear la conductividad y pH de la solución nutritiva que se usará en la irrigación del cultivo.
- Regular pH y CE a niveles requeridos por el cultivo.
- Medir nivel de los recipientes de ácido, base, nutriente y mezcla.
- Desarrollar una interfaz que permita el monitoreo a distancia del cultivo.
- Construir una estación NFT de prueba para cosechar un lote de lechuga con no más de 100 litros de agua.
- Generar una base diaria de datos que almacene muestras del pH y la CE en el cultivo desde su implantación hasta la cosecha.

---

## 2. JUSTIFICACIÓN:

Las plantas que crecen en ambientes hidropónicos son independientes totalmente del suelo y el confort que éste les produce, por lo que, para poder cosechar, el agricultor debe recrear las condiciones mínimas necesarias de la tierra en el sistema de agua. Este problema conlleva dotar a la planta de los nutrientes necesarios disueltos en agua por medio de la solución nutritiva, y en el caso particular de un sistema de película de nutrientes NFT, el control de la cantidad presente de éstos, ya que la planta se alimenta de ellos continuamente disminuyendo los niveles de nutrientes con cada recirculación del agua. Así mismo, los nutrientes no pueden ser absorbidos por la planta si el pH del agua no se mantiene en los niveles requeridos por la misma, por lo que, de igual manera, es necesario verificar continuamente el nivel del pH y corregirlo de ser necesario, agregando al sistema un ácido, o una base según sea el caso. La planta necesita disponer de nutrientes a lo largo del día, y si no los encuentra se fatigará, lo que mermaría su desarrollo o hasta podría provocar su muerte, lo mismo pasa si el nivel de pH del agua le imposibilita alimentarse, por lo que resulta evidente que la presencia constante del agricultor en el cuidado del cultivo es indispensable en un sistema hidropónico de película de nutriente [1].

Con la realización de este trabajo, la necesidad de la intervención del agricultor en el cuidado del cultivo será reducida ampliamente, logrando que el agua se mantenga en los niveles de pH y CE requeridos, haciendo casi autónomo al cultivo y mejorando sustancialmente la calidad del cultivo al evitar por completo la fatiga de la planta [2]. Además, el sistema permitirá el monitoreo a distancia del cultivo, y creará una base de datos que servirá para generar una estadística de sus necesidades a lo largo de su desarrollo, y ayudará en posibles mejoras o adaptaciones de futuras cosechas.

---

### 3. ESTADO DEL ARTE:

La regulación de pH y CE, junto con algunos otros parámetros han jugado un papel fundamental dentro de una gran variedad de industrias, destacándose la industria química y la de los alimentos, donde el control de estos parámetros muchas veces sigue siendo manual, haciendo poco confiables los resultados, aún sabiendo que un adecuado cuidado de estos parámetros, lleva a la realización de productos de mayor calidad, con estándares específicos, logrados en un tiempo menor y con un desperdicio de insumos reducido.

El control de pH es un problema abordado en el área de tratamiento del agua, *Santos (2009)* lo asume desde la perspectiva de la potabilidad del agua para consumo humano, tomando en cuenta un pH neutro como salida del sistema, su control se basa en el aditamento de un ácido y una base a manera de neutralizar el agua, abordando el problema de la no linealidad que representa el modelo de la disolución química al comportarse de una manera no proporcional ante adiciones iguales de reactivos, y analizando una serie de controles posibles para su modelo como lo son el control adaptativo y el control de una linealización exacta del sistema. Implementa el control en el sistema compuesto por el contenedor que recibe las soluciones acidas o básicas, demostrando que con el control adaptativo para su aplicación específica se obtenían los resultados deseables [3].

*Cano y Yañez(2012)* abordan la problemática del pH en un proceso industrial de producción de detergente donde se busca que éste se mantenga en un rango específico, para abordar el problema de la no linealidad se hace uso de la lógica difusa para hacer que se consiga un buen comportamiento frente a los cambios, como el que tendría el sistema con una persona estando al mando, logrando así el control óptimo del pH para su aplicación específica [4].

Enfocando la problemática, que es el control de pH y CE dentro de un cultivo hidropónico, hay aún poca información y mucho por hacer, *D. Domingues et al.(2012)*, hacen hincapié en la relevancia que han adquirido los sistemas de cultivo sin suelo, las enormes ventajas que representa para la producción alimentaria actual, así como sus posibles desventajas. Se estudia la problemática del control de CE, así como del pH en un cultivo de lechuga, se desarrolla un software

---

de interfaz hombre máquina que permite el monitoreo tanto de CE y el pH como de la temperatura de la solución, haciendo una comparación del sistema hidropónico NFT, con el sistema de cultivo tradicional en suelo para observar las diferencias entre un método y otro. El método consiste en manipular las válvulas continuamente de acuerdo con los datos que recopile el sistema para así determinar si la SN requiere de ácido o de base y al final estabilizar el sistema en un valor específico de pH requerido para el cultivo de lechuga. Además, se pone de manifiesto la absorción continua de nutrientes por parte de la lechuga, que provoca un desequilibrio en las lecturas de CE del agua y que es compensada con la adición de más nutrientes a la solución, esto último es relativamente fácil al haber una relación proporcional entre la cantidad de nutrientes presentes en el agua y la medición de valor de CE. Al final se logra demostrar un desarrollo de la planta prácticamente igual tanto en el sistema hidropónico como en el cultivo en el suelo, debido a la corrección instantánea de los parámetros del agua, además de resaltar las capacidades productivas de la hidroponía con respecto a las del suelo [2].

Existe en el mercado europeo un dispositivo de la empresa Prosystem Aqua encargado de la regulación tanto de pH como de CE, haciendo uso de dosificadoras precisas para verter la solución, sin embargo parecen abordar la regulación de pH basándose en la simple respuesta de las válvulas ante la falta de algún compuesto, por lo que parece carecer de una estrategia de control que demuestre concretamente la funcionalidad, además que el precio ronda los 2600 euros, lo que lo hace caro y no apto para todo tipo de mercado [5].



---

## **4. MARCO TEÓRICO:**

### **4.1 HIDROPONÍA:**

La definición etimológica del término hidroponía proviene del griego Hydro (agua) y Ponos (labor o trabajo), lo que nos habla de un trabajo con agua. Es sabido que las plantas al igual que los humanos necesitan de nutrientes para poder subsistir, estos nutrientes en condiciones normales son tomados del suelo por las raíces y después llevados al resto de la planta para su transformación y aprovechamiento, la hidroponía entonces, se desarrolló como una alternativa de crecimiento de cultivos en medios sin suelo, tomando como base el agua. Para lograr hacer prosperar una planta es necesario dotarla de la cantidad de nutrientes que tendría disponibles en la tierra, para esto se hacen estudios de los componentes de la tierra ideal para cada tipo de cultivo para después agregarlos en SN para que sean proporcionados a la planta [6].

#### **4.1.1 NUTRIENTES:**

Los estudios de fisiología vegetal han determinado la importancia de una serie de elementos en el correcto desarrollo de las plantas. Cada planta es muy diferente por lo que las necesidades varían, sin embargo, se establece que los elementos esenciales, que permiten sobrevivir a la planta son los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S), que son los elementos más demandados para su desarrollo, y los micronutrientes (Cl, B, Fe, Mn, Zn, Cu y Mo) que son elementos que se requiere en menor medida [7].

---

## 4.2.2 TÉCNICAS:

### 4.2.2.1 SUSTRATOS:

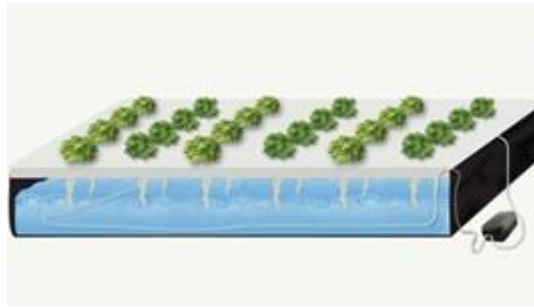
Al carecer de suelo firme para cosechar es necesario establecer medios donde la planta pueda emitir raíz y obtener los nutrientes de la SN. La técnica de sustratos permite dotar a la planta de un medio donde pueda anclar su raíz y mantener humedad como lo haría en la tierra. Los sustratos deben ser medios inertes, es decir no deben proveer de ningún compuesto, ni reaccionar de ninguna forma a la presencia de la planta, ya que los nutrientes son proporcionados por la SN y el sustrato tiene sólo la tarea de mantener la presencia de estos en la planta. Como sustratos suelen usarse grava, arenas, piedra pómez, aserrines, arcillas expansivas, carbones, cascarilla de arroz, fibra de coco y algunos otros [6]. La Figura 1 ilustra algunos de los sustratos empleados y la manera en que se ven en la planta.



**Figura 1: Sustratos empleados hidroponía [6].**

### 4.2.2.2 RAÍZ FLOTANTE:

Esta técnica consiste en la SN en un recipiente, al cual se le coloca una tapa con orificios donde las plantas son introducidas de manera que la raíz esté siempre en contacto con la SN, esto último se ilustra en la Figura 2 donde se puede apreciar un lote de lechugas implantado mediante esta técnica. Este sistema al ser un sistema cerrado requiere la constante oxigenación del agua para evitar organismos indeseados, lo cual se logra agitando ocasionalmente o inyectando aire a la SN [6].



**Figura 2: Técnica de raíz flotante [6].**

#### 4.2.2.3 AEROPONÍA:

Es una técnica donde la planta es sostenida de manera que la raíz quede al aire y la SN es proporcionada por medio de una aspersion o nebulización de la raíz [6]. La Figura 3 muestra el diagrama de operación de esta técnica y su aspecto en un sistema real.



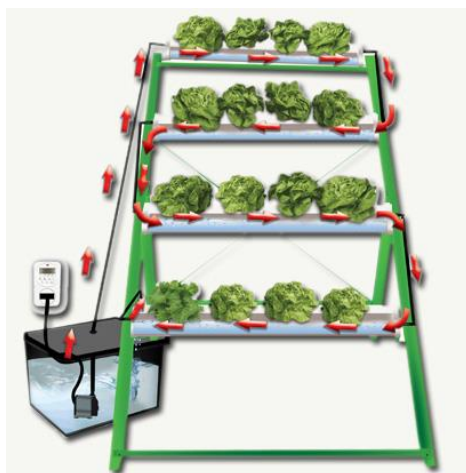
**Figura 3: Técnica de aeroponía [6].**

#### 4.2.2.4 NFT.

NFT o técnica de película nutritiva es un sistema que consiste en hacer circular por canaletas una película de SN donde la planta pueda tomar los nutrientes, siendo utilizadas como canaletas tubos perforados de PVC donde se introducen las plantas ya germinadas. La Figura 4 muestra el esquema principal de un sistema NFT donde se puede ver un lote de lechuga alimentado por la SN

---

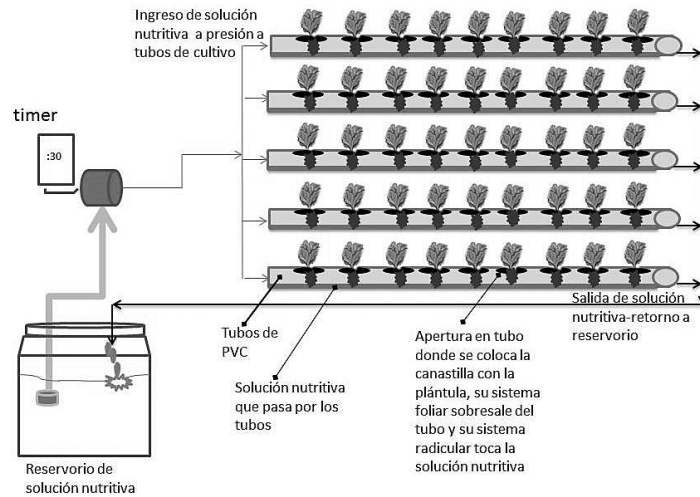
recirculante. La principal diferencia con raíz flotante es el hecho de que el agua regresa al depósito de donde salió originalmente y suele estar en constante circulación [6].



**Figura 4:** Esquema básico del funcionamiento de la técnica NFT [6].

El sistema hidropónico NFT se caracteriza por su flexibilidad en cuanto a la configuración a adoptar. Existen diversas maneras de adoptar el sistema, habiendo dos configuraciones principales de las cuales se desprenden otras variantes.

La Figura 5 muestra una de las configuraciones más utilizadas en NFT, puede apreciarse la bomba de agua que distribuye la SN a través de los canales, éstos a su vez, con una ligera inclinación hacen recorrer el agua por gravedad y tal como se indica por las flechas la SN retorna al contenedor.



**Figura 5: Sistema hidropónico NFT[6].**

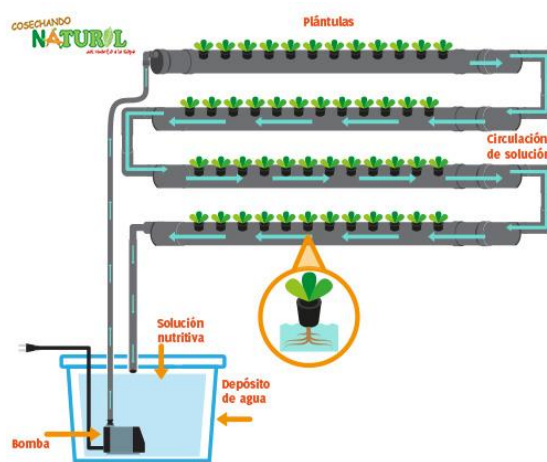
Dentro de este tipo de sistema podemos encontrar diferentes configuraciones, la Figura 6 muestra un cultivo de manera vertical al que se le aplica la SN en la parte superior para que caiga por gravedad, debiendo tener cuidado en una correcta ubicación del flujo, de manera que ninguna planta se quede sin agua. La Figura 6 también muestra una disposición muy común, en la cual se aplica el principio de la Figura 5, distribuyéndose de manera piramidal o vertical, eficientando de cierta manera el uso del espacio.



**Figura 6: Configuración vertical y piramidal del sistema NFT[6].**

---

La otra posible configuración consiste en establecer un solo canal de cultivo mediante el cual, el agua se distribuya, la Figura 7 muestra cómo la bomba sube el agua al primer canal y ésta cae por gravedad haciendo un recorrido en zigzag, es evidente que el sistema se simplifica al no tener que usar elementos extra como mangueras y tuberías, sin embargo, se debe cuidar la longitud de los canales debido a que al haber sólo un canal de SN recorriendo el sistema, la calidad de la SN al inicio del recorrido no es la misma que al final, ya que en ese trayecto la SN pierde nutrientes, pero sobre todo oxígeno, lo cual puede mermar el desarrollo del cultivo. Varios autores recomiendan no exceder una totalidad de 15 metros por canal [7].



**Figura 7: Recorrido del agua en el sistema NFT[31]**

Dentro de esta configuración se puede encontrar también diferentes disposiciones, la Figura 8 muestra una disposición en zigzag, tal como la de la Figura 7, con el único agregado que al sistema se le adicionaron canales extras para eficientizar el uso del espacio, la Figura 9 muestra una disposición en forma circular descendente muy poco común, pero que logra también una buena utilización del espacio.



**Figura 8: Configuración zigzag aprovechando más espacio [6]**



**Figura 9: Configuración espiral del sistema NFT[6]**

---

#### 4.2.2.4.1 VENTAJAS DEL NFT:

- Permite un control más preciso sobre la nutrición de la planta.
- Maximiza el contacto directo de las raíces con la SN, por lo que el crecimiento de los productos es acelerado, siendo posible obtener en el año, más producción.
- Si se maneja de la forma correcta el sistema, permite cultivar hortalizas de consumo en fresco y de alta calidad.
- En el sistema NFT la recirculación de la SN, permite evitar posibles deficiencias nutricionales.
- La instalación de un sistema NFT resulta más sencilla (menor número de bombas para el riego de la SN, no se tiene el problema de la obstrucción de los goteros, etc.).
- Las plantas cosechadas se remueven fácilmente.
- Un sistema pequeño puede soportar a una planta grande [6].

#### 4.2 PH:

El pH o potencial de hidrógeno es una medida de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) y/o iones hidroxilos ( $OH^-$ ) presentes en las disoluciones acuosas, fue propuesta en 1909 por Soren Sorensen con el fin de facilitar su manejo, ya que estas cantidades suelen ser muy pequeñas y es difícil trabajar con ellas. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno expresado en mol/L [8].

$$pH = -\log[H^+]$$

La definición de logaritmo negativo nos proporciona un número positivo que expresa solamente la cantidad de iones hidrógeno presentes en la disolución, dejando de lado las unidades, por lo que la medida del pH es una cantidad adimensional. Así que, tomando en cuenta la definición, una



disolución con un pH igual a 7 es igual a (0.0000001) ó  $1 \times 10^{-7}$ . Los iones hidrógeno presentan una relación inversamente proporcional a los iones hidroxilos, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1: Escala de pH**

pH	$H^+$	$H^+$	$OH^-$
0	$10^{-0}$	1	0.0000000000000001
1	$10^{-1}$	0.1	0.000000000000001
2	$10^{-2}$	0.01	0.00000000000001
3	$10^{-3}$	0.001	0.0000000000001
4	$10^{-4}$	0.0001	0.00000000001
5	$10^{-5}$	0.00001	0.000000001
6	$10^{-6}$	0.000001	0.00000001
7	$10^{-7}$	0.0000001	0.0000001
8	$10^{-8}$	0.00000001	0.0000001
9	$10^{-9}$	0.000000001	0.00001
10	$10^{-10}$	0.0000000001	0.0001
11	$10^{-11}$	0.00000000001	0.001
12	$10^{-12}$	0.000000000001	0.01
13	$10^{-13}$	0.0000000000001	0.1
14	$10^{-14}$	0.000000000000001	1

---

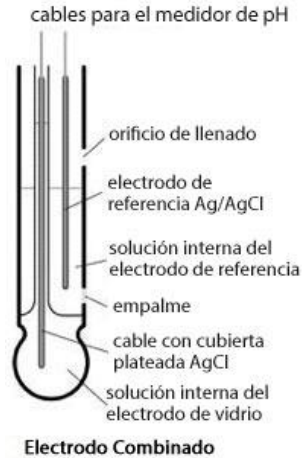
El pH se suele manejar en una escala de 0 a 14, pudiendo realmente tomar valores menores que 0 o mayores que 14, en base al pH se pueden clasificar las disoluciones en 3 grupos: disoluciones ácidas si el pH es menor a 7, disoluciones básicas si el pH es mayor a 7 y disoluciones neutras si el pH es igual a 7. Para este último caso se tiene el agua pura que a una temperatura de 22°C tiene un pH neutro [8].

#### 4.2.1 REGULACIÓN DE pH:

La regulación del pH de una sustancia se hace acidificando o alcalinizando respectivamente, es decir, mover por arriba o por abajo del pH neutro que se encuentra en 7, esto último se logra con la adición de un ácido o una base. Como ya se explicó, el ácido, al contener iones hidrogeno, incrementará la cantidad de éstos dentro del sistema y bajará el pH de éste, de igual manera que para el ácido, la base agregará hidroxilos al sistema, aumentando su pH.

#### 4.2.2 MEDICIÓN DEL pH:

Para realizar la medición de pH de una disolución, se hace uso de electrodos especiales que se encargan de convertir la diferencia de iones en un voltaje pequeño que después es interpretado por una etapa de acondicionamiento que permite amplificar e interpretar las distintas señales obtenidas. En un principio estos electrodos estaban divididos en dos, uno que servía de referencia, ya que al medir la diferencia de potencias, el electrolito se consume y se necesita una referencia en la cual se puedan definir las variaciones del potencial medido, y el otro que mida estas variaciones. Hoy en día, estos dos electrodos se encuentran incluidos en un mismo dispositivo llamado electrodo combinado, característica que lo vuelve más práctico. La Figura 10 ilustra cada una de las partes de este electrodo combinado.



**Figura 10: Estructura electrodo de pH [9]**

El electrodo combinado mide la diferencia de potenciales entre los dos lados del electrodo de vidrio. Para poder realizar la medición de los potenciales, se debe cerrar el circuito, esto se logra a través de soluciones al interior del electrodo, la solución a la que se le está realizando la medida y el medidor de pH.

Cuando el electrodo se sumerge en la solución medida, la bombilla de vidrio detecta los iones de hidrógeno presentes como una señal de un pequeño voltaje, debido a la carga positiva de los iones de hidrógeno. La solución interna capta la señal pequeña de voltaje de la bombilla de vidrio. Esta señal luego es pasada al electrodo interno. El alambre de plata transmite esa señal al cable del electrodo que va al medidor. El electrodo de referencia que contiene el electrolito, o la solución de llenado, genera un voltaje pequeño y constante, que se transfiere al alambre de plata. Luego, este alambre transmite la señal, que puede ser considerada un "control" medido para el cable del electrodo. El circuito se cierra con una cantidad diminuta de solución interna del electrodo de referencia que pasa a través de una membrana porosa hecha de mechas de cerámica. Esta membrana o empalme, como se lo denomina, se encuentra en el cuerpo del electrodo. El medidor de pH mide la diferencia entre el electrodo interno y el electrodo de referencia en milivoltios de corriente continua. Esta lectura de milivoltios luego es procesada por el medidor y se muestra en unidades de pH [9].

---

### 4.3 ÁCIDOS Y BASES:

Un ácido, cómo ya quedó asentado en la definición de pH, es una disolución en la cual, se encuentra presente una mayoría de iones hidrógeno, mientras que una base es una disolución con una mayoría de iones hidroxilos, dentro de estos dos tipos de disoluciones se encuentran los ácidos y bases, fuertes y débiles. Se les denominan fuertes cuando en teoría todas sus moléculas se ionizan completamente en el agua y débiles cuando su ionización ocurre limitadamente dentro de la disolución [8].

#### 4.3.1 ÁCIDOS Y BASES EMPLEADOS EN LOS CULTIVOS HIDROPÓNICOS:

En teoría, cualquier ácido o base puede ser empleado dentro de un cultivo hidropónico, ya que cualquiera cumpliría la función de hacer variar el pH a los rangos establecidos, sin embargo, existen algunos que por sus características suelen ser más propicios que otros, en el caso de los ácidos tenemos como posibles candidatos: el ácido clorhídrico, el ácido nítrico y el ácido sulfúrico, y como candidatos para alcalinizar se tienen: el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio e hidróxido de amonio. Se tiene que poner especial atención en la adición de estas sustancias reguladoras y su respectiva ionización, ya que cada una de ellas aporta nuevos iones a la solución, los cuales pueden ser indeseados o requeridos, pero afectarían las proporciones establecidas por la sustancia nutritiva [10].

### 4.4 LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:

La CE se define como la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica y es la inversa de la resistencia. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm) [11].

---

En el caso de medidas en soluciones acuosas, el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de iones disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la CE. Es decir, entre más nutrientes estén presentes en la solución hidropónica, mayor será la CE de ésta, la relación proporcional que existe entre la cantidad de nutriente y la CE facilita la medición y por lo tanto el control de este parámetro en los cultivos hidropónicos [6], [12].

#### **4.4.1 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD:**

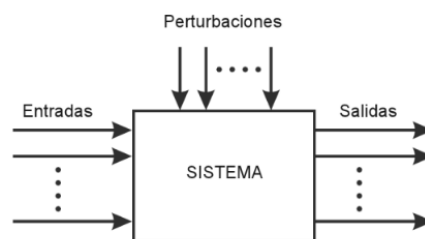
Existen dos métodos para lograr determinar la capacidad de conducción de una sustancia, el amperimétrico y el de resistencia. El método amperimétrico, como su nombre lo indica, se enfoca en la medición de una corriente, se tienen dos electrodos a los cuales se les aplica una diferencia de potencial conocida y se mide la corriente alternada que pasa a través de ellos, basándose en la ley de ohm  $V=R*I$ , siendo V el voltaje aplicado R la resistencia e I la corriente entre los dos electrodos, entonces cuanto más sea la corriente obtenida, mayor será la CE de la sustancia. En cambio, el método de resistencia depende totalmente de la distancia entre los electrodos y la superficie que estos ocupan, por lo que deben ajustarse estos parámetros para cada rango de medición, pudiéndose ver afectado por la acumulación de sales. El sistema de cuatro anillos está basado en el principio de inducción y elimina los problemas comunes asociados al sistema amperimétrico. A dos anillos externos se les aplica una corriente alterna; mientras que dos anillos internos miden la diferencia de potencial inducida por el flujo de corriente, el cual depende de la conductividad de la solución donde se ha sumergido la sonda [12]. La Figura 11 muestra un electrodo comercial de conductividad donde pueden apreciarse los anillos.



**Figura 11: Electrodo de conductividad [13]**

#### 4.5 CONTROL:

Un sistema se define como una combinación de componentes que actúan conjuntamente para alcanzar un objetivo específico. Un sistema tendrá por lo general tres aspectos importantes a considerar, una entrada, posibles perturbaciones y una salida, la representación básica de un sistema se muestra en la Figura 12. Casi cualquier proceso de la vida cotidiana puede ser visto como un sistema, para clarificar, por ejemplo, al conducir un auto pisamos el acelerador que es nuestra entrada al sistema, y obtenemos una respuesta que es el incremento de la velocidad que se podría considerar la salida del sistema, por otra parte, nos enfrentamos a vientos en contra que podrían afectar la velocidad a la que nos movemos, esto serían nuestras perturbaciones [14].



**Figura 12: Representación básica general de un sistema[15]**

Un sistema de control se encarga de tratar de regular la salida del sistema a través de las entradas a un valor predefinido. En la analogía del manejo del auto, el conductor actúa como el sistema de

---

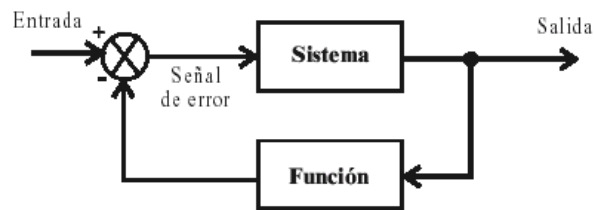
control del auto, al pisar o dejar de pisar el acelerador para mantener la velocidad en el rango que él desea.

Existen dos configuraciones de sistemas de control, lazo abierto y lazo cerrado. En un sistema de control de lazo abierto, la salida siempre se rige por las variaciones en la señal de entrada y no es capaz de realizar compensaciones a las perturbaciones que se suman a la señal de actuación del controlador, ya que carece de retroalimentación. La Figura 13 muestra el esquema básico de un sistema de control en lazo abierto, donde puede apreciarse que la salida no se comunica con la entrada, imposibilitando la retroalimentación del sistema.



**Figura 13: Representación de un sistema de control en lazo abierto [11]**

La Figura 14 muestra el esquema básico de un sistema de control de lazo cerrado que compara la señal de la respuesta de la salida con la respuesta de la señal de entrada mediante una retroalimentación lo cual permite estimar las perturbaciones para así corregirlas.



**Figura 14: Representación de un sistema de control en lazo cerrado [16]**

Para poder hacer el control de cualquier proceso es necesario primero modelar matemáticamente el sistema. Estos modelos pueden estar en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Los modelos

---

en el dominio de la frecuencia pueden ser abordados por medio de funciones de transferencia y son utilizados en sistemas de comportamiento lineal e invariantes en el tiempo. Los modelos en el tiempo suelen ser usados para sistemas más complejos de varias entradas y salidas.

#### 4.5.1 TIPOS DE CONTROL:

Existen diferentes tipos de controles, entre ellos, el más conocido y utilizado es el proporcional integral derivativo (PID), que puede variar a proporcional integral, o proporcional derivativo. Estos controles mejoran la respuesta de nuestro sistema ante cambios en la entrada, además pueden disminuir el error que el sistema presente en condiciones estables. Es una estrategia relativamente fácil de implementar si los modelos matemáticos se prestan para ello, ya que si los modelos se complican, este tipo de controles suelen tornarse en problemas muy complejos [17].

Los controladores ya mencionados son eficaces a la hora de mantener el sistema estable, pero carecen de eficiencia al no incluir las incertidumbres y los cambios a los que esta susceptible el sistema. Existen alternativas de control desarrolladas recientemente que ayudan a sobrellevar estos problemas, como son: el control adaptivo, el control robusto y el control difuso [17].

##### 4.5.1.1 CONTROL ADAPTIVO:

Es un tipo de control no lineal, el cual puede modificar su comportamiento en base a los cambios presentes en la dinámica del sistema y a perturbaciones. La principal diferencia de un sistema de control por realimentación común es que éste, está pensado para trabajar sobre un punto de funcionamiento fijo y los parámetros del controlador permanecen constantes, e incluso sigue siendo válido ante pequeñas perturbaciones, en cambio si el punto de funcionamiento varía considerablemente, el control retroalimentado deja de ser válido y suele usarse el control adaptativo [18], [19].



---

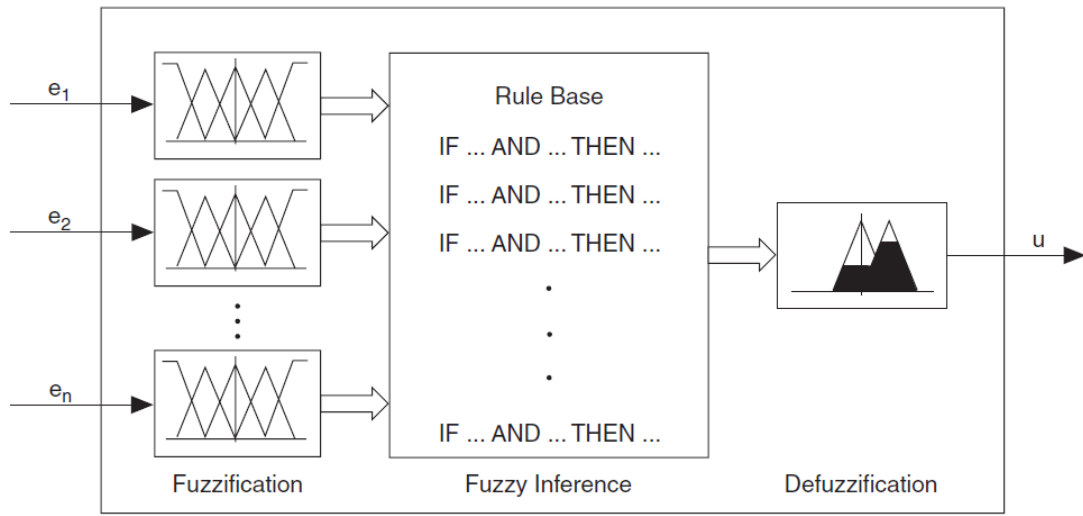
#### 4.5.1.2 CONTROL ROBUSTO:

Las características del diseño de un control van a depender en gran medida, de la precisión con la que se haya abordado el problema. Sin embargo, uno de los principales enfoques que se toman es, la simplificación de los modelos matemáticos, con el fin de considerar los aspectos más importantes, que lleven a representar el comportamiento del sistema lo más cercano posible a la realidad, ya que muchas veces, abordar el problema considerando todos sus posibles parámetros, resulta en una gran complejidad, estas simplificaciones introducen incertidumbres en el sistema que llevarán en mayor o menor medida a errores. El control robusto se encarga de tomar en cuenta estas incertidumbres del diseño, para considerarlas en el control y hacer el sistema más preciso [20].

#### 4.5.1.3 CONTROL DIFUSO:

El control difuso es una alternativa muy útil para cuando se tienen sistemas con un modelo matemático muy complejo, como se implementó para el control de pH en la realización de un detergente, cuyo modelo era difícil de obtener [4]. Este tipo de control utiliza una base de conocimientos previamente generados, que le sirven al sistema para tomar decisiones, tal como lo hace el pensamiento humano, este control basa su funcionamiento en la lógica difusa [18], [19].

Un sistema difuso se compone básicamente de tres partes: Entradas, Fuzzificación, Método de Inferencia y Defuzzificación, y Salidas, como lo muestra la Figura 15:



**Figura 15: Estructura básica de un sistema difuso.**

#### 4.5.1.3.1 FUZZIFICACIÓN:

Las variables que se sienten, están en un dominio que todos interpretamos comúnmente con números puntuales, sin embargo, en un sistema difuso, un mismo valor puntual puede tomar distintos valores, es por eso que se necesitan establecer funciones, las cuales representen estas propiedades. Un sistema difuso opera con este tipo de funciones las cuales quedan definidas por variables lingüísticas y funciones de membresía, para determinar en base a su método de inferencia, la salida adecuada del sistema, es por eso que es necesario definir el rango de valores que tomará el sistema, así como las variables lingüísticas y los valores que toman.

#### VARIABLES LINGÜÍSTICAS:

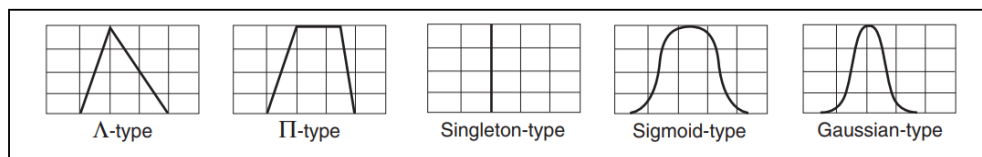
Las variables lingüísticas representan con palabras, las variables de entrada y de salida del sistema que se quiere controlar. Una variable lingüística consta de términos lingüísticos que caracterizan o definen una variable, el diseñador es el que decide como nombrar estos términos lingüísticos y cuántos de ellos definen bien a la variable que se está representando. El número de términos lingüísticos no está limitado, sin embargo, muchas de las aplicaciones donde se usa un sistema

---

difuso suelen ser bien abordadas con tres a siete términos, y suele usarse cierta simetría entre los términos que definen la variable.

#### FUNCIONES DE MEMBRESÍA:

Las funciones de membresía son funciones matemáticas que describen los términos lingüísticos. Representan el grado en el que un valor de las variables de entrada pertenece a un término lingüístico definido y acotado por esta función de membresía. Existen funciones de membresía estandarizadas usadas en sistemas difusos como las que se muestran en la Figura 16.



**Figura 16: Funciones de membresía estandarizadas utilizadas en sistemas difusos.**

#### 4.5.1.3.2 INFERENCIA DIFUSA:

El corazón de un sistema difuso se encuentra en su inferencia, es decir en cómo opera en base a las variables de entrada, para determinar la mejor salida para lo que se espera del sistema. Para este fin hace uso de una base de reglas que básicamente es la información proporcionada del comportamiento del sistema ante diferentes entradas, y posteriormente opera con estas entradas en el dominio difuso para obtener una salida difusa.

#### BASE DE REGLAS:

Las reglas de control describen con palabras, la relación que existe entre cada una de las variables lingüísticas definidas y sus términos lingüísticos correspondientes. Para crear esta base de reglas es necesario conocer la manera en que se espera el sistema responderá ante diferentes entradas. Para este fin, se establece un antecedente y una consecuencia, es decir si se cumple una declaración con las variables de entrada, entonces se realiza una tarea con las variables de salida, para el antecedente se usa IF y para la consecuencia se utiliza THEN. En una base de reglas deben evitarse

las contradicciones, es decir, que para una misma entrada se tenga una misma salida. Todas las posibles combinaciones entre los términos lingüísticos de entrada y de salida deben ser definidos, o en su defecto, establecer un caso por default para que el controlador pueda actuar en aquellos casos que no están establecidos.

#### CONEXIÓN DE ANTECEDENTES:

En caso de que el sistema difuso contenga más de una variable de entrada o de salida, es necesario usar una operación de conector que establezca la lógica a seguir por la regla. Es decir, establecer la manera en que se relacionan los antecedentes y las consecuencias. Estos operadores no son boléanos como pudiera pensarse, son especialmente definidos para lógica difusa y se muestran a continuación.

**Tabla 2: Conectores utilizados en la inferencia difusa**

<b>Operador:</b>	<b>Fórmula:</b>
AND(Mínimo)	$\mu_{A \cdot B} = \min(\mu_A \cdot \mu_B)$
AND(Producto)	$\mu_{A \cdot B} = \min(\mu_A, \mu_B)$
OR(Máximo)	$\mu_{A+B} = \max(\mu_A, \mu_B)$
OR(Probabilístico)	$A + B = ((A + B) - (AB))$

#### 4.5.1.3.3 DEFUZZIFICACIÓN:

Cuando se fuzzifica un sistema, se convierten valores puntuales en términos lingüísticos y en variables lingüísticas respectivamente, para poder trabajar con ellos dentro de la lógica difusa, pero estos valores no sirven a la hora de aplicar los resultados a un sistema, por lo que los resultados que arroje el sistema de inferencia difuso, deben ser convertidos otra vez a valores reales puntuales, interpretables por un sistema. La defuzzificación es el método por el cual los valores difusos de la salida, toman valores puntuales dentro del dominio real. Los métodos de fuzzificación empleados comúnmente en sistemas difusos se muestran en la Tabla 3:

**Tabla 3: Métodos de defuzzificación más comunes**

<b>Método de Defuzzificación:</b>	<b>Ecuación:</b>
Centro de Área:	$Salida = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) * x dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) dx}$
Centro de sumas:	$Salida = \frac{CGA_1 * Area_1 + CGA_2 * Area_2 + \dots + CGA_n * Area_n}{Area_1 + Area_2 + \dots + Area_n}$
Centro de máximo:	$Salida = \frac{x_1 \mu_1 + x_2 \mu_2 + \dots + x_n \mu_n}{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}$

#### 4.6 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS:

Hoy en día, a la hora de resolver un problema de automatización, existen muchos tipos de tecnologías que pueden ser implementadas para llegar a la solución, ninguna de ellas siendo mejor que otra, debido a que cada una posee características que pueden ser de vital utilidad dependiendo de la aplicación. Dentro de los dispositivos electrónicos con los que podemos realizar automatización, existen tres tecnologías que son ampliamente utilizadas y que encajan con las características del sistema a desarrollar, ya que son capaces de recibir señales analógicas y digitales provenientes del sensado y procesarlas para actuar sobre el sistema, estas son las tarjetas de adquisición de datos, los PLC y los microcontroladores.

##### 4.6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) son dispositivos electrónicos que actúan como una interfaz entre una computadora y señales en las cuales se tenga un interés y se estén sensando. Su

---

principal función es, recibir señales analógicas de sensores y digitalizarlas para que puedan ser interpretadas por la computadora. Está compuesta básicamente por tres partes, el acondicionamiento de señal, que se encarga de adaptar las señales para que sean legibles para el convertidor, el convertidor análogo digital se encarga de convertir la señal continua a discreta y un bus de datos que se encarga de pasar la información obtenida a la computadora para su posterior uso. Además, incluye también algunas funciones para automatizar procesos, ya que cuenta con entradas y salidas digitales que se pueden usar para controlar un proceso externo, y además temporizadores para generar pulsos, útiles en algunas aplicaciones de automatización. La Figura 17 muestra el proceso que se sigue en la utilización de una DAQ, en el cual se tiene un dispositivo de sensado que es procesado por la tarjeta la cual envía la información a la PC y esta a su vez, puede regresarle instrucciones para llevar a cabo ciertas acciones programadas.



**Figura 17: Estructura básica de un sistema DAQ[21]**

La principal característica que la distingue de las demás tecnologías es que está concebida para ser usada en medición de señales y por lo tanto sus velocidades de muestreo son muy altas, lo que le permite ser usada en aplicaciones de control complejas, donde se necesite tener información prácticamente instantánea del estado del sistema, como lo es en un brazo robótico, por ejemplo.

La programación de estos dispositivos suele ser sencilla, ya que los fabricantes incorporan las herramientas necesarias para cada modelo que comercializan, haciéndola lo más sencilla posible, tal es el caso de National Instruments y sus herramientas, que permiten hacer un uso rápido y sencillo de las DAQ [21].

#### 4.6.2 PLC

Los PLC (Controladores Lógicos Programables) son dispositivos electrónicos parecidos a una computadora como la que conocemos comúnmente, al igual que estas, cuenta con una unidad central de procesamiento, memoria, así como periféricos de entrada y salida para aplicaciones de automatización. Está pensado para utilizarse en condiciones industriales e incluye una etapa de acondicionamiento para adaptar las salidas y entradas digitales con relés, lo que lo hace robusto.

Esta tecnología nació de la necesidad de sustituir la lógica a base de relés físicos, implementada inicialmente en la industria, debido a que esta última requería demasiado mantenimiento, así como de un conocimiento total del sistema para la comprensión del mismo. Su aplicación está básicamente orientada a la industria, pero no limitada, maneja estándares de voltajes de alimentación de 24V y tienen la ventaja de que sus capacidades en términos de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, pueden ser ampliadas de acuerdo a las necesidades que se presenten, ya que se comercializan módulos individuales enteros que pueden ser acoplados al PLC, así como módulos con funciones específicas como los diseñados para controles PID o para comunicaciones [22]. La Figura 18 ilustra algunos módulos que pueden ser acoplados al PLC y la utilidad de cada uno.



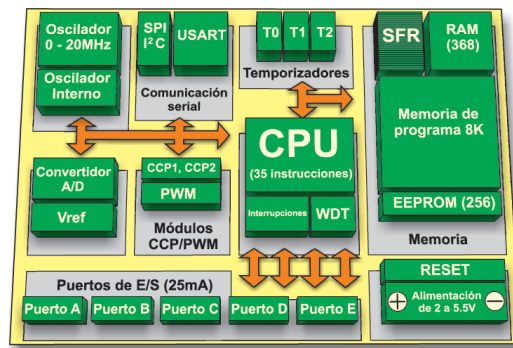
Figura 18: Estructura básica de un PLC [22].

---

### 4.6.3 MICROCONTROLADORES

Los microcontroladores son circuitos integrados que contienen los elementos básicos de una computadora como lo son: una CPU (unidad central de procesamiento), y periféricos de entrada y salida, por lo que son considerados como microcomputadoras. Están pensados para ser utilizados en aplicaciones específicas, de procesamiento significativo como sistemas de control o automatismos. Son dispositivos de bajo consumo de energía, y basan su entero funcionamiento en la programación que se les aplique, ya que sin ella no tienen utilidad alguna.

Su principal clasificación está dada por el tamaño de palabra que manejan habiendo de 4, 8, 16 y últimamente de 32bits, esto último junto con la capacidad de frecuencia de reloj, define las capacidades y potencias de procesamiento que incorporan. Cada modelo contiene una serie de funcionalidades diferentes, dependiendo del microcontrolador, pueden contener unidades con funciones específicas como temporizadores, convertidores analógico a digital, moduladores de ancho de pulso, y capacidad para establecer comunicación bajo diferentes protocolos como UART como se muestra en la Figura 19.



**Figura 19: Estructura general de un microcontrolador [23].**

La programación de los microcontroladores se realiza dependiendo del modelo, pero la mayoría de fabricantes tienen software que facilita este proceso y es posible utilizar lenguajes de alto nivel



---

como Lenguaje C, además de contar con la posibilidad de usar lenguaje ensamblador directamente, pero resultando algo complejo.

#### 4.7 BOMBAS:

Las bombas son dispositivos hidráulicos basados en motores eléctricos, y al igual que estos pueden ser tanto de corriente directa como de corriente alterna, la diferencia radica en que las bombas hidráulicas tienen acoplado a su eje rotor, un dispositivo llamado *impeller* (impulsor), que está guardado dentro de una cámara con dos orificios, uno coaxial al rotor (*inlet*) y otro perpendicular al rotor (*outlet*). El *impeller* al estar acoplado al rotor, comienza a girar cuando accionamos el motor, esto provoca que el fluido presente en la entrada (*inlet*) comience a ser succionado e impulsado hacia arriba hacia la salida (*outlet*), creando una presión que es la que genera la fuerza para que el motor pueda levantar contra la gravedad los fluidos. La Figura 20 muestra un diagrama interno de todo lo anterior, y la Figura 21 muestra una imagen real de una bomba de agua comercial desarmada donde puede ser apreciado el *propeller*.

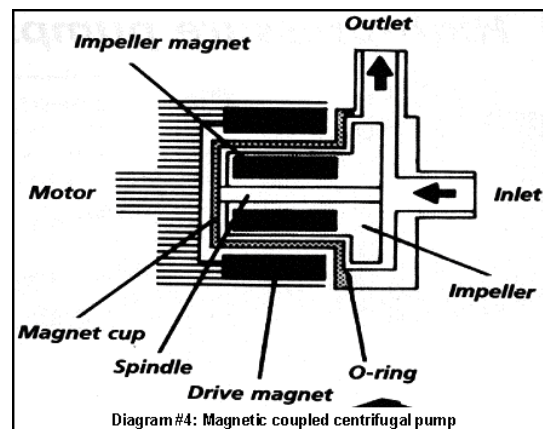


Figura 20: Diagrama general de una bomba de agua [24]



**Figura 21: Bomba comercial desarmada [26]**

#### 4.7.1 BOMBAS PERISTÁLTICAS:

Existen bombas hidráulicas que operan bajo otros principios, tal es el caso de las bombas peristálticas. Su funcionamiento se basa en la presión direccionada ejercida hacia un tubo flexible mediante la cual se crea un flujo de fluido. Debe su nombre a la peristalsis, que es el proceso mediante el cual el ser humano crea una serie de contracciones musculares para el transporte de los alimentos hacia el estómago, este es el mismo principio que se emplea al empujar el contenido de una pasta dental, por ejemplo. La presión sobre el tubo flexible es ejercida por una serie de rodillos acoplados a un motor que al girar va moviendo el fluido contenido dentro del tubo. La Figura 22 muestra el principio de funcionamiento, donde se puede apreciar cómo el líquido llega a uno de los rodillos, éste comienza su giro a la izquierda y con él el movimiento del líquido y así respectivamente hasta que se crea un flujo continuo. Estas bombas encuentran su uso en aplicaciones donde se quiere evitar el contacto directo de los fluidos con la bomba, ya que estos siempre se encuentran dentro del tubo, además los flujos pequeños son fácilmente controlables por lo que pueden ser utilizadas en aplicaciones donde se necesita tener un estricto control de flujo.

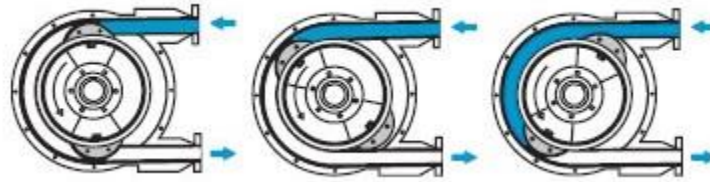


Figura 22: Principio de funcionamiento de una bomba peristáltica [27].

#### 4.8 ETAPA DE POTENCIA:

Debido a la naturaleza de los motores de corriente directa y su respectiva alta demanda de corriente, muchas veces resulta imposible conectarlos directamente a los controladores, debido al tipo de tecnología que emplean cuyos manejos de corrientes rondan algunos miliamperios, es por eso que se suele hacer uso de una etapa de potencia que se encargue de gestionarle estas corrientes al sistema independientes a la etapa de control, logrando evitar así un desperfecto. Para este fin, se hace uso de dispositivos que soportan corrientes elevadas, como son los transistores de potencia empleados como interruptores, logrando con una pequeña corriente en la base abrir el interruptor y hacer que el motor se alimente directamente de la fuente como lo ilustra la Figura 23.

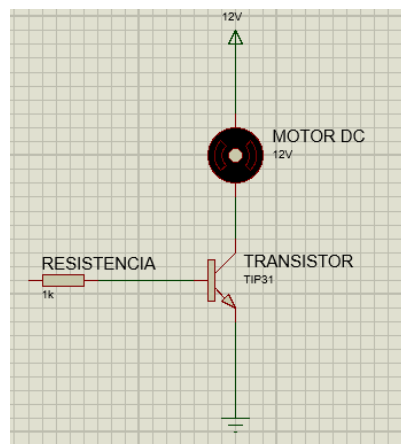
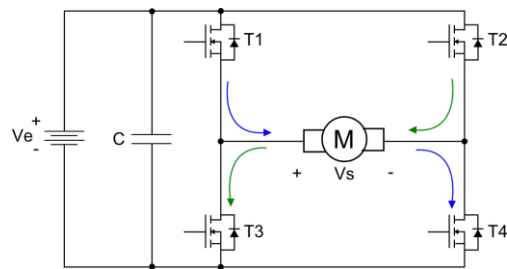


Figura 23: Motor controlado por transistor

---

Con el principio del transistor como interruptor se han creado arreglos ya diseñados comerciales, que nos permiten gestionar estas corrientes a la carga, carga que pueden ser válvulas solenoides, motores o cualquier dispositivo que demande una corriente considerable. En el caso de los motores es posible controlar con la ayuda de uno de estos dispositivos, hasta su respectiva dirección de giro. La Figura 24 muestra su principio de funcionamiento, los transistores de potencia están actuando como interruptores, la activación de T1 y T4 y la desactivación de T2 y T3 provocan una corriente mostrada en la figura de color azul, así mismo invirtiendo las activaciones de las interrupciones obtenemos una corriente en otro sentido mostrada en la figura de color verde. El sentido de esta corriente es la que determina la dirección del giro de nuestro motor. Estos dispositivos son conocidos comercialmente como puentes H y son un elemento fundamental en el acoplamiento del controlador con los elementos de accionamiento.



**Figura 24: Principio de funcionamiento de un Puente H[28]**

#### 4.9 INTERFAZ GRÁFICA:

Una interfaz hombre-máquina (IHM), se define como "todas las partes de un sistema interactivo (software o hardware) que proporcionan la información y el control necesarios para que el usuario lleve a cabo una tarea con el sistema interactivo". La interfaz es el punto de acción en que un hombre entra en contacto con una máquina. El caso más simple es el de un interruptor: No se trata de un humano ni de una "máquina" (la lámpara), sino una interfaz entre los dos. Para que una interfaz hombre-máquina sea útil y significativa para las personas, debe estar adaptada a sus

---

requisitos y capacidades. Por ejemplo, programar un robot para que encienda la luz sería demasiado complicado y un interruptor en el techo no sería práctico para una luz en un sótano [19].

La interfaz permite que el operador, en ciertas circunstancias, vaya más allá del manejo de la máquina y observe el estado del equipo e intervenga en el proceso. La información se proporciona por medio de paneles de control con señales luminosas, campos de visualización o botones, o por medio de software que utiliza un sistema de visualización que se ejecuta en una terminal, por ejemplo. Con un interruptor de una lámpara, la información visual se proporciona a partir de la impresión de "luz" y la configuración del interruptor en "encendido" y "oscuridad" con el interruptor "apagado" [29].

#### 4.9.1 LABVIEW:

LabView es un ambiente de programación diseñado para crear interfaces virtuales para aplicaciones de control, LabView cuenta con una variedad de funciones ya establecidas que nos permiten utilizarlo con diferentes dispositivos, puede adquirir y generar datos desde protocolos como USB, PCI y sistemas basados en Ethernet. Cuenta con más de 600 funciones para la síntesis de señales, probabilidad y estadística, análisis frecuencial, matemáticas, ajustes de curvas, procesamiento digital y analógico etc. Después de adquirir y procesar datos es capaz de mostrar la información de una manera sencilla y exacta por medio de un instrumento virtual es capaz de generar reportes guardar datos y puede ser conectado a Internet. LabView se ha convertido en una herramienta importante en la ingeniería debido a su intuitividad y al hacer posible controlar y monitorear procesos desde una PC para simplificar la tarea del ingeniero [22].

---

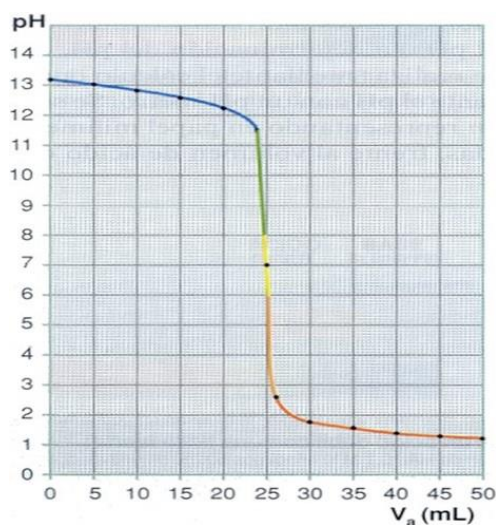
## 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Las disoluciones químicas son objeto de interés en muchos procesos industriales, para nuestro caso de estudio se tiene que en los cultivos hidropónicos se debe mantener una presencia constante y uniforme de nutrientes en las plantas, esto se logra diluyendo en una solución acuosa llamada SN, que es la encargada de proporcionar estos elementos a la planta. La necesidad nutrimental específica de cada planta está determinada por su fisiología y hay estudios ya realizados de los elementos nutritivos, que han determinado su influencia particular en el desarrollo de las plantas y han generado fórmulas establecidas para su óptimo desarrollo [7], si bien cada fórmula establece una cierta cantidad de cada elemento nutrimental para cada planta, a la hora de poner en marcha un sistema hidropónico la planta comienza a absorber los elementos conforme a sus necesidades y con el pasar del tiempo, no se puede saber a ciencia cierta la cantidad presente de cada elemento en la solución si no es con un estudio minucioso de laboratorio[7]. En la hidroponía, la herramienta sencilla con la que se cuenta para estimar la cantidad total de nutrientes presentes en una SN es la CE, éste último parámetro da una idea del estado nutrimental del cultivo.

Por otra parte, se tiene que los cultivos se deben mantener en un rango de pH que les permita a las plantas tener disponibles los nutrientes para su correcta absorción ya que hay una estrecha relación entre el pH y la solubilidad de los elementos nutritivos, por lo que a valores de pH por encima o por debajo del rango establecido como ideal, la disponibilidad de elementos se ve afectada. Se estableció un rango de entre 5.5 y 6.5, por ser el rango en el que la mayoría de los elementos están disueltos y pueden ser aprovechados por la planta [6]. Al igual que sucede con la cantidad de nutrientes presentes en la SN, el pH varía una vez implementado el sistema hidropónico ya que las plantas y el agua de reposición tienden a modificarlo. Por lo que es necesario agregar un ácido o una base para ajustar el pH al valor deseado, esto último dependerá del tipo de elemento empleado como nutriente.

---

La definición propia pH se establece como el logaritmo negativo de los iones hidrógeno presentes en la disolución, muestra por sí misma el comportamiento no lineal de abordar el problema de la regulación del pH, como se ilustra en la Figura 25 donde se agrega un volumen de ácido a una sustancia alcalina, además se tiene que tomar en cuenta que los problemas de disoluciones se abordan desde el punto de vista ideal, ya que en la práctica resulta que la adición de un ácido o una base en una disolución química, no resulta necesariamente en la ionización de todas sus moléculas y por lo tanto el modelo del sistema no es para nada preciso [8]. Cabe mencionar que la adición de ácido o base a la disolución termina también afectando los parámetros nutrimentales de la solución y por lo tanto su CE y que estos últimos parámetros a su vez se ven afectados por la temperatura.



**Figura 25: Comportamiento del pH [30].**

Teniendo en cuenta todos los puntos anteriores, se pueden proponer varias estrategias para abordar el problema, entre ellas el control clásico, sin embargo, dada la no linealidad presente, conlleva un problema complejo. Una opción para poder hacer llevadero el problema es linealizar el sistema e intentar aplicar un control clásico, sin embargo, las perturbaciones antes mencionadas podrían tener una gran influencia y no llevarnos a una solución adecuada. Una opción que se ha abierto paso en los últimos años es la utilización de sistemas de control difusos en la solución de problemas industriales, su gran auge se debe a que no se necesita conocer los parámetros del sistema, sino

que su actuación se basa en un sistema de reglas basadas en el conocimiento del comportamiento del sistema, la entrada de un sistema difuso es la salida del mismo y ha demostrado ser superior a los controles clásicos en determinadas aplicaciones [4].

Por lo que en el presente trabajo se propone la realización de un sistema de control difuso que controle el pH, utilizando un ácido como regulador, así como la CE que estará determinada por el consumo de agua y la reposición de la misma, el ácido será proporcionado al sistema por medio de una bomba peristáltica con un caudal controlable, además, se hará uso de un depósito con agua proveniente de un pozo profundo con características del lugar y de una bomba que se encargue de ingresar el agua al sistema. Se construirá un sistema NFT de lechugas, en el cual se hará uso de un sensor de pH y uno de CE para medir las condiciones de la SN a lo largo del desarrollo del cultivo, y de sensores de nivel para medir la cantidad de líquidos presentes en el sistema, se monitoreará el sistema desde una interfaz que permita conocer en todo momento su estado, a la vez que se tomarán datos diariamente que permitan llevar un registro del comportamiento del cultivo a lo largo del tiempo, y que serán almacenados en algún software de edición de documentos, un diagrama general del sistema se presenta en la Figura 26.

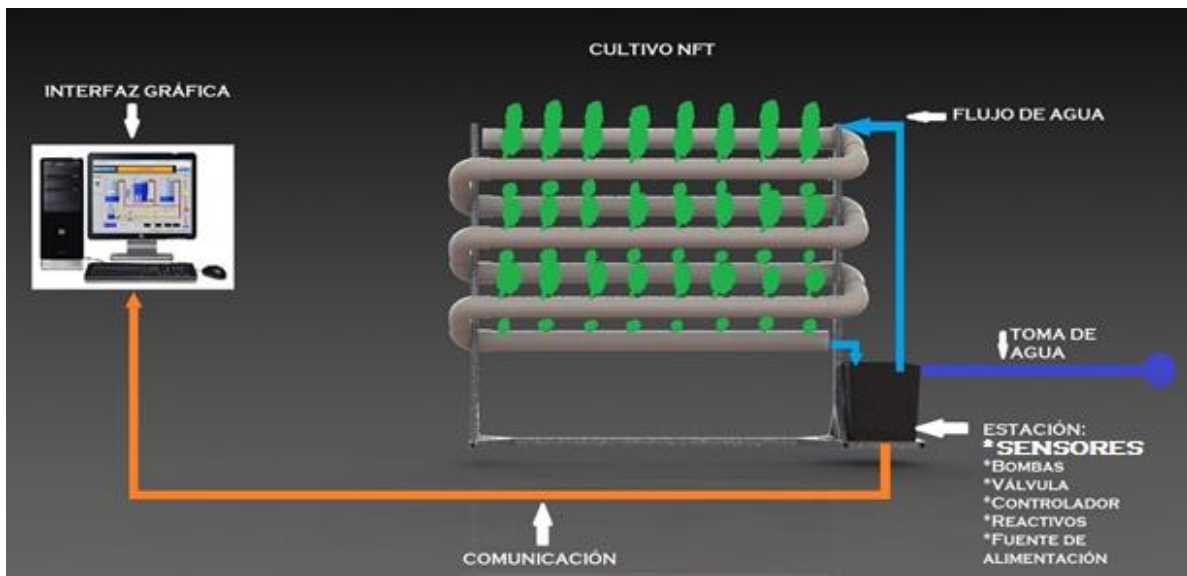


Figura 26: Diagrama general del sistema.



---

## 6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN:

### 6.1 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL SISTEMA NFT:

Se optó por utilizar el sistema NFT de un solo canal ya que logra eficientar al sistema en términos de espacio, al convertir los metros cuadrados horizontales en verticales permitiendo mayor producción. Además, el hecho de que los objetivos para el sistema estén limitados a una cierta cantidad de SN y por consiguiente a una cierta cantidad de plantas, el sistema de un solo canal permite cumplir con los objetivos además de que facilita la distribución hidráulica al necesitarse solo una línea de alimentación de flujo para distribuir la SN.

#### 6.1.2 TAMAÑO DEL CULTIVO:

Dentro de un sistema de cultivo hidropónico la cantidad de plantas a cultivar está estrechamente relacionada con la cantidad de SN disponible para utilizar. Así mismo la cantidad de SN a utilizar se verá influenciada por las necesidades de consumo del cultivo. El sistema está planteado para ser probado en un cultivo de lechuga, una lechuga llega a consumir en su punto de máximo desarrollo un promedio de 0.3 litros de solución nutritiva por día [2], y para un sistema hidropónico NFT el espacio necesario entre planta y planta es de 25 cm, tomando en cuenta que se seleccionó el sistema de un solo canal y este no puede exceder 15 metros de longitud, se tiene que se pueden cultivar 60 plantas como máximo, sin embargo a la hora de establecer dimensiones, se decidió que los canales tuvieran 2m de largo, de manera que el número de canales se ve limitado solamente a un número par es decir 14 metros de longitud, quedando un total de 56 lechugas posibles dentro del sistema.

Teniendo 56 lechugas como nuestra referencia y considerando el consumo diario máximo de agua por planta en el cultivo de 0.3 litros, se tiene que la cantidad de agua necesaria para satisfacer a las lechugas es de aproximadamente 17 litros, siendo la cantidad justa sin embargo esta cantidad resulta muy limitada y tomando en cuenta el consumo diario y los posibles valores extremos de CE y pH que podría alcanzar , y además la influencia de la temperatura ante un volumen pequeño, se decidió establecer un volumen de 100 litros para el tanque de SN.

---

### 6.1.3 SOLUCIÓN NUTRITIVA:

En términos de nutrición de plantas en sistemas hidropónicos no hay un consenso general de cuál es la concentración de cada mineral necesaria para desarrollar un cultivo, la cantidad difiere de planta en planta y de autor en autor, teniendo sólo como constante que hay elementos que son absorbidos en mayor cantidad (macronutrientes) y otros que son necesarios en menor medida (micronutrientes), teniendo esta base de información es posible generar formulas propias partiendo de sustancias químicas, sin embargo existen ya numerosas soluciones comerciales que cumplen con los criterios necesarios para un correcto desarrollo de un cultivo [6], en el caso particular de este proyecto se requiere una solución adecuada para la lechuga y la comercializadora Hydroenvironment cuenta ya con una formula desarrollada para hortalizas en general, tomando en cuenta que el costo de esta fórmula ronda los 160 pesos el kilo y medio, y que conseguir al menudeo sustancia por sustancia para desarrollar nuestra propia formula incrementa el precio, se optó por usar la fórmula de Hydroenvironment.

### 6.1.4 ÁCIDO Y BASE:

Para la regulación de pH dentro de un cultivo hidropónico suelen recomendarse el uso de ácidos o bases dependiendo de los iones usados en la SN, que no contengan alguno de los elementos empleados en la misma para evitar acumulación indeseada de ciertos elementos, por eso en el desarrollo del sistema se hará uso de ácido sulfúrico como ácido, debido a que no aporta elementos presentes en la solución inicial [7], y además suele ser una sustancia fácil de conseguir. El ácido fue probado a una concentración de 1 molar y en base a pruebas se logró determinar que es una buena concentración para el volumen de la SN.

### 6.1.5 MATERIALES:

#### 6.1.5.1 CANALES:

La construcción de un sistema NFT implica la correcta elección de los materiales a usar, debido a que se maneja agua con un gran contenido de sales y se hace uso de sustancias corrosivas como los ácidos y las bases, es necesario escoger los materiales adecuados para los componentes del sistema. Es evidente que el uso de metales como conductores implica el posible riesgo de

---

corrosión, es por eso que a lo largo del desarrollo de la hidroponía se han venido utilizando materiales inertes tales como los plásticos, el más ampliamente utilizado de ellos por sus prestaciones de durabilidad y resistencia es el PVC, además de ser un material barato y fácil de manejar. En el mercado se encuentran disponibles los PVC comerciales utilizados en las redes hidráulicas, y también los PVC especializados que están optimizados para un cultivo NFT con geometrías especiales que evitan el taponamiento del flujo, tal como se muestra la Figura 27, sin embargo, esta clase de PVC tiene un costo muchísimo mayor ascendiendo a los \$200 pesos por metro lineal mientras que el PVC convencional no supera los \$60 pesos el metro lineal, además de que ha demostrado en diferentes proyectos ser lo suficientemente capaz de llevar a buen término un cultivo por lo que para el desarrollo de este proyecto se hará uso de PVC comercial por motivos económicos.

En cuanto a las medidas de la tubería PVC los proyectos suelen desarrollarse con diámetros de 3 y 4 pulgadas para hortalizas[6], se decidió utilizar PVC de 4 pulgadas para la realización del proyecto, ya que las canastas portadoras de plántulas disponibles tienen un fondo de 2 pulgadas, es recomendado que la raíz de la planta no esté sumergida en su totalidad para evitar asfixia, por lo que un diámetro de 4 pulgadas deja la suficiente holgura para hacer que la raíz contacte el flujo de SN sin quedar sumergida de más, además de que la raíz tiene un mayor volumen que ocupar y no genera embudos como podría pasar con un diámetro menor como el de 3 pulgadas.



**Figura 27: PVC comercial especializado [6]**

---

#### 6.1.5.2 CONTENEDORES:

Los contenedores tanto del ácido y de la base, como de la SN deben ser al igual que el material de los canales del cultivo un material inerte que sea capaz de manejar sales, por lo que para tales efectos se hará uso de contenedores de plástico comunes, y todos estos se dispondrán dentro de una misma estación junto al controlador para fines de aprovechamiento de espacio

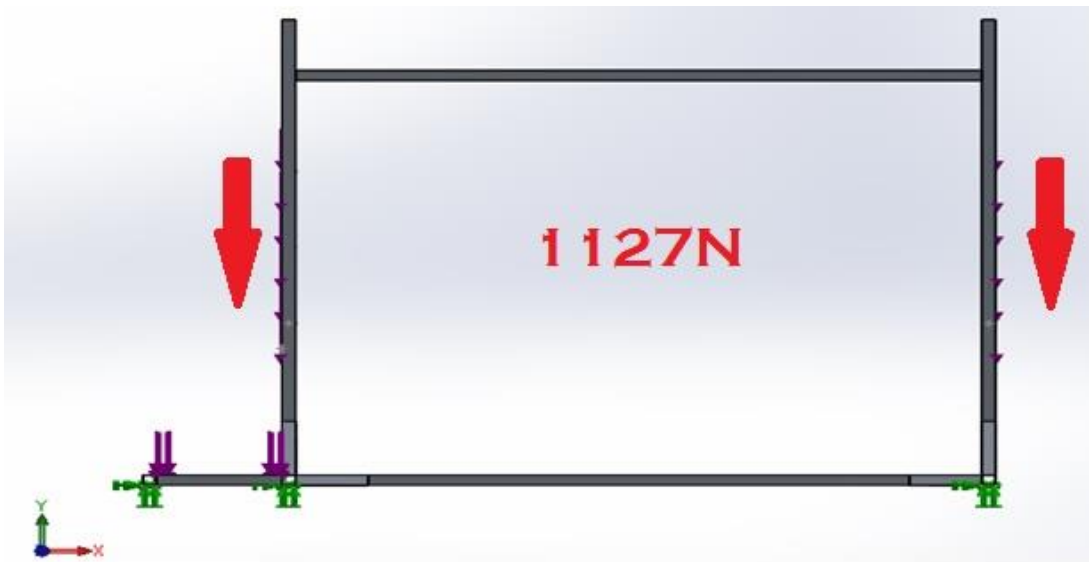
#### 6.1.5.3 ESTRUCTURA BASE:

El sistema debe ser sostenido por una base firme, para este fin se propone la construcción de una base de dos metros de largo con una altura de 1.80mts, la cual se muestra en el Anexo B. Para la construcción de esta base se seleccionó PTR cuadrado de 2 pulgadas por ser económicamente más accesible, ya que materiales como el aluminio salen de los rangos presupuestados, si bien existe el riesgo de corrosión, una buena protección con pintura es suficiente para hacerlo funcionar y alcanzar las metas propuestas.

Para garantizar que la estructura fabricada fuera lo suficientemente fuerte para sostener el sistema, se realizó una simulación de elemento finito, en la cual se hizo uso de un perfil cuadrado básico del espesor del PTR. Se agregaron las fuerzas a las que estaría sometido la estructura, para determinar si el diseño propuesto estaba soportando adecuadamente el peso aplicado. La fuerza se calculó tomando en cuenta el peso de las plantas en su etapa máxima de desarrollo teniendo un peso total de 28 kilos, el peso total de PVC fue de 21 kilogramos. Por último, se tiene que considerar la presencia de SN dentro de los canales, haciendo un cálculo holgado, estableciendo que los canales estuvieran llenos de SN hasta la mitad, se tiene que resultarían 65 kilogramos de agua aproximadamente, por lo que haciendo la suma de estos y multiplicándola por la gravedad se obtiene una fuerza en la estructura de 1127N, como se muestra en la Tabla 4 y en la Figura 28.

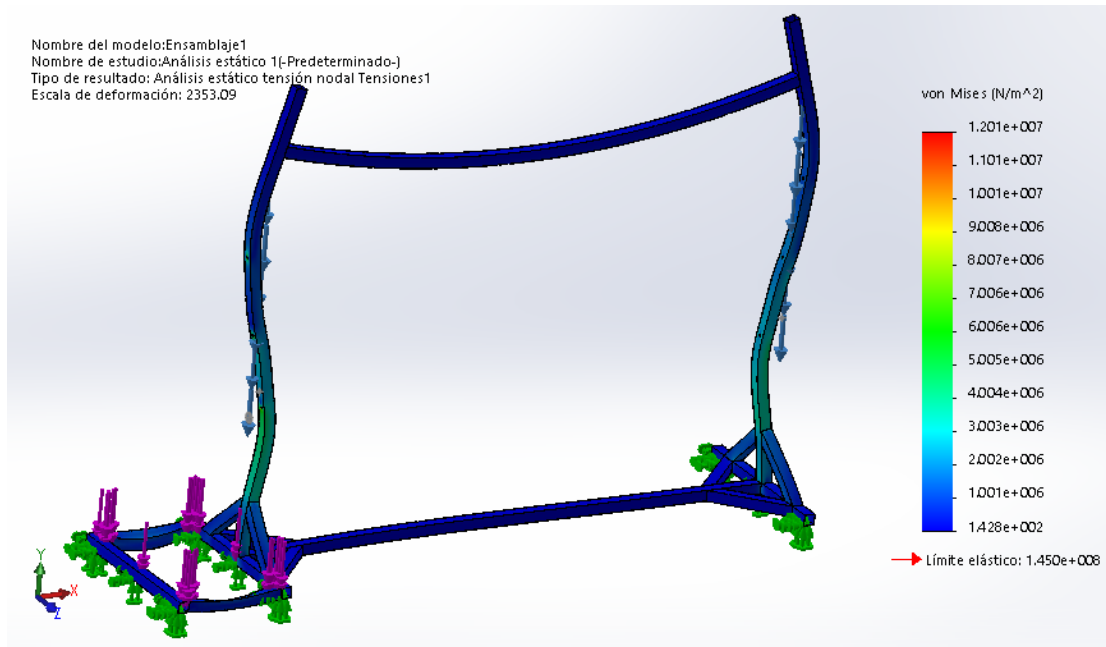
**Tabla 4: Cálculo de fuerzas en la estructura**

Elemento	Cantidad	Peso por unidad	Peso acumulado
Lechugas	56 unidades	150gr c/u	28kg
PVC	14 metros	9kg (6 metros)	21 kg
Agua	65 litros	1 kg/litro	65 kg
		<b>Total:</b>	114 kg
		<b>Fuerza: (*9.8m/s<sup>2</sup>)</b>	1127 N



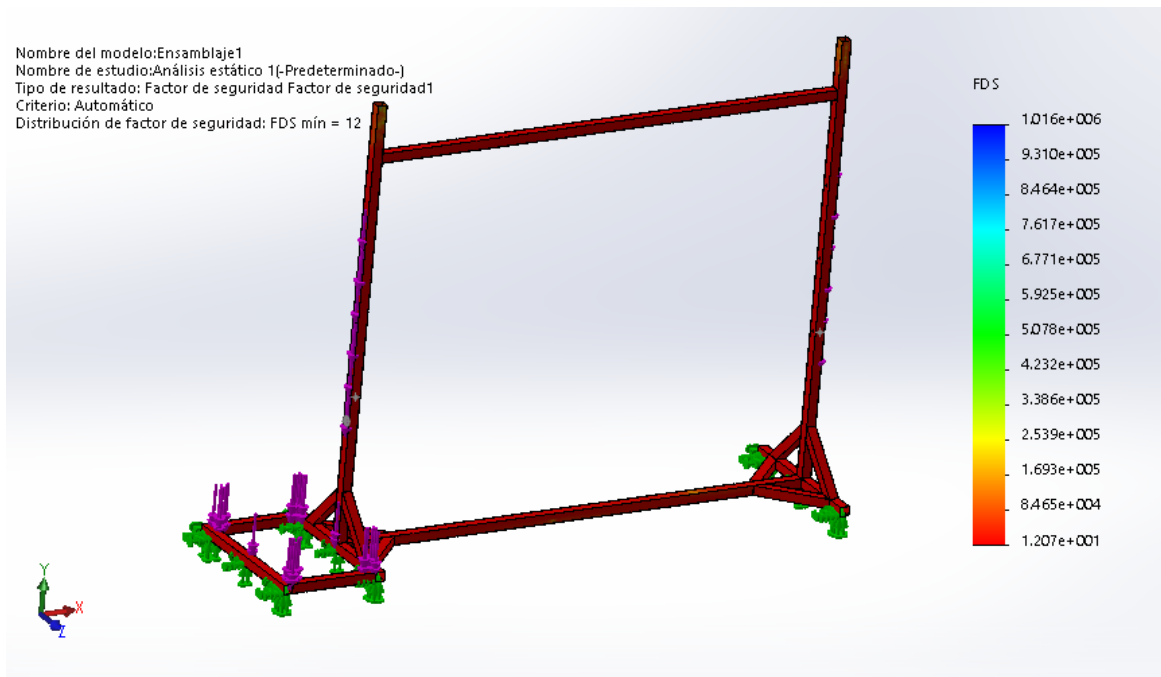
**Figura 28: Vista frontal de la estructura y de las fuerzas presentes.**

En la Figura 29 se puede observar la estructura con una deformación exagerada para hacerla representativa, lo que es de interés es el color que muestra ya que de acuerdo a la escala del lado derecho al no presentar tonalidades rojizas podemos concluir que la estructura no alcanza el límite elástico y por lo tanto no está bajo esfuerzos intolerables.



**Figura 29: Análisis de deformación de la estructura**

En la Figura 30 se puede corroborar ahora mediante el estudio de factor de seguridad que el diseño está 12 veces sobrado de su máximo esfuerzo permitido, como lo muestra el factor mínimo encontrado por la simulación en la esquina superior derecha, pero sabiendo se consideraron niveles de SN muy por arriba de los niveles reales, se puede decir que el sistema está en un rango de funcionalidad bueno. Un boceto general del sistema es presentado en el Anexo A.



**Figura 30: Análisis de factor de seguridad**

## 6.2 SENSORES:

Una etapa crucial del desarrollo de este proyecto es la elección de los sensores que se encargarán de proporcionar las señales al sistema de control para lograr la automatización del sistema, los que determinan las características del sistema que nos llevarán a dar solución a las necesidades planteadas.

Tomando en consideración el análisis previo, se eligieron las distintas características a analizar tanto el sensor de pH, el sensor de CE y el sensor DE nivel estableciéndose las siguientes: rango de medición, condiciones de operación, voltaje lógico, requerimientos de alimentación, precisión y costo.

Los criterios empleados para el análisis en la selección de los sensores fueron los siguientes:

---

**Rango de medición:** El rango de valores medidos en el sistema para los cuales obtenemos una salida precisa del sensor.

**Voltaje lógico:** La lógica o voltaje usado en las salidas de los sensores.

**Requerimientos de alimentación:** El voltaje de operación del sensor y/o su requerimiento de corriente.



**Precisión:** La capacidad del sensor de no variar su salida ante los cambios y repetitividad de los valores de medición.

**Costo:** El valor del sensor en el mercado.

**Condiciones de operación:** La capacidad del sensor de operar en condiciones necesarias del sistema como son la humedad y la operación continua.

### 6.2.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE CONDUCTIVIDAD:

**Tabla 5: Comparativa de sensores de conductividad**

<b>Criterio</b>	<b>Sensor 1:</b>	<b>Sensor 2:</b>
		
<b>Rango de medición:</b>	1-20 mS/cm	0-5 mS/cm
<b>Voltaje lógico:</b>	Voltaje análogo de salida de 0 a 5 v	Voltaje análogo de salida de 0 a 5 v






<b>Requerimientos de alimentación:</b>	5-7.5 Volts	5-15 volts
<b>Precisión:</b>	<± 5%	<±0 .2% error.
<b>Costo [\$MXN]</b>	2,296	1500
<b>Condiciones de operación</b>	Operación discontinua	Operación continua, uso industrial.

### 6.2.2 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE CONDUCTIVIDAD:

Para el sensor de Conductividad sólo se tienen dos opciones ya que no son muy comunes los sensores comerciales al alcance, podemos ver que el sensor 2 tiene significantes ventajas respecto al sensor 1. El rango de medición que requerimos para el sistema oscila entre 0 y 3 milisiemens [7], y en este rubro el sensor 1 mide un amplio rango, lo que nos lleva a medidas con más incertidumbre, a diferencia del otro cuyo rango oscila de 0 a 5 milisiemens, dando más certeza en las medidas, el punto quizá más importante es el hecho de que el sensor 2 puede realizar medidas en tiempo continuo, tal y como está pensado el proyecto, mientras que el sensor 1 implicaría una calibración frecuente del electrodo, por último podemos ver que el precio es significativamente más bajo para el sensor 2, por estas razones se decidió utilizar este último en el proyecto.

### 6.2.3 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE PH:

Tabla 6: Comparativa de sensores de pH

Criterio	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
			
<b>Rango de medición</b>	0-14 V	0-14	0-14 pH
<b>Voltaje lógico:</b>	Salida de voltaje analógico de 0 a 5	Salida de voltaje analógico de 0 a 5	Salida de voltaje analógico de 0 a 5
<b>Requerimientos de alimentación:</b>	5V	3.3-12V	5.00V
<b>Precisión:</b>	$\pm 0.2\text{pH}$	$\pm 0.1\text{pH}$	$\pm 0.1\text{pH}$
<b>Costo [\$MXN]:</b>	1,292	826	1749
<b>Condiciones de operación</b>	Intermitente debido al electrodo	Intermitente debido al electrodo	Operación tiempo real grado industrial gracias al electrodo

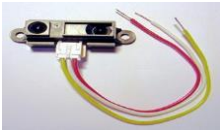
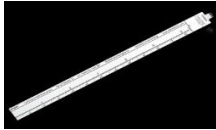

### 6.2.4 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE pH:

Para el sensor de pH, al igual que en el de CE, se requiere que las medidas se hagan continuamente sin tener que sacar el electrodo del sistema para realizar calibraciones, es por eso que el sensor 3

presenta una ventaja considerable con respecto a los otros dos, ya que como se puede ver en términos de precisión, rangos de medición y alimentación, no difieren mucho. Considerando la operación continua como su punto más fuerte dejaremos de lado el precio como factor y se seleccionará el sensor 3.

### 6.2.3 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SENSOR DE NIVEL:

**Tabla 7: Comparativa de sensores de nivel**

<b>Criterio</b>	<b>Sensor 1: Sharp Analógico</b>	<b>Sensor 2: Resistivo</b>	<b>Sensor3: Ultrasónico</b>
			
<b>Rango de medición:</b>	10-80 cm	12 pulgadas	0.2 a 4 metros
<b>Voltaje lógico:</b>	Voltaje de salida de 0 a 3V	Sensor resistivo, compatible al hacer un acondicionamiento (700Ω vacío, 85Ω lleno)	Salida pulsada de 5V con necesidad de acondicionamiento
<b>Requerimientos de alimentación:</b>	30V -30mA	Según acondicionamiento	5V- 2mA
<b>Costo [\$MXN]</b>	300	1,142	125
<b>Material:</b>	Varios	(PET)	Varios

---

### 6.2.5 SELECCIÓN PARA EL SENSOR DE NIVEL:

Dentro del sistema es necesario conocer el nivel de SN dentro del contenedor para poder tomarlo como variable dentro del controlador. Para la medición de la cantidad de SN disponible se tienen diferentes opciones, las cuales se describen a continuación. Para el sensor de Nivel se tiene que considerar que el sensor va a medir sustancias de consideración, por lo que lo ideal sería que el nivel se mida sin entrar en contacto con el líquido, por lo que los sensores 1 y 3 se prestan para ello, si bien el sensor 2 está hecho de plástico, el alto precio es un factor para descartarlo, de los dos restantes podemos ver que el rango de medición que más se adapta es el del sensor 3 además de que es más barato, por lo que se seleccionó este último.

### 6.3 BOMBA:

Una etapa de vital importancia dentro del proyecto es la selección de las bombas de agua que se encargarán de distribuir la SN a través del canal, así como de agitarla y reponer el agua. Se sabe, debido a estudios anteriores, que el caudal necesario por canal para un cultivo hidropónico NFT ronda entre 1 y 2 litros por minuto, pudiendo llegar hasta los 4 litros por minuto [7].

Los criterios en los cuales se basó el análisis de las diferentes opciones de bombas fueron los siguientes:

**Alimentación:** El tipo y magnitud de la fuente de la que se servirá para funcionar

**Altura máxima:** La altura máxima a la que la bomba podrá elevar el agua.



**Consumo:** La potencia absorbida por la bomba

**Caudal:** El volumen de agua procesado en un intervalo de tiempo.

**Precio:** El costo de adquisición.

### 6.3.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE BOMBAS:

**Tabla 8: Comparativa de bombas**

Criterio	<b>Bomba Sumergible AC</b> 	<b>Bomba Sumergible DC</b> 
<b>Alimentación</b>	110/120V AC	12V DC
<b>Consumo</b>	4.5watts	5watts
<b>Altura</b>	0.6 metros	3 metros
<b>Caudal</b>	230 litros por hora	240 litros por hora
<b>Precio[\$MXN]</b>	90	195

### 6.3.2 SELECCIÓN DE BOMBA:

Tomando en cuenta las limitantes antes citadas, y si bien las dos bombas disponibles rondan el caudal máximo permitido, es evidente que la bomba de corriente alterna no levanta más de 60 centímetros y el canal más alto en nuestro sistema debido a la configuración elegida ronda los dos metros de altura, por lo que esta bomba no cumple con dos criterios fundamentales. En cambio, la bomba con alimentación directa nos permitirá elevar el agua hasta los 3 metros, y su caudal es suficiente para trabajar en el rango del volumen establecido de la SN, es por eso que se dejó de lado el precio y se eligió la bomba de corriente directa.

---

### 6.3.3 BOMBA PARA AGITAR:

Debido a que es necesario crear un flujo de agua dentro del recipiente para tratar de homogenizar la mezcla que se va a ir dando, se pensó con fines prácticos el utilizar una bomba sumergible igual a la que se utilizaría para elevar el agua a los canales, a fin de crear el flujo dentro del tanque de SN, si bien este flujo pudiera haberse creado con un agitador de aspas, resultaba poco práctico a la hora de acoplarlo al sistema debido a la complejidad de su implementación. Debido a que la hidroponía viene de un proceso manual, no existen estudios que determinen un flujo específico o recomendado que nos ayude en la selección de una bomba en específico, y una simulación de flujo turbulento es compleja y sale de los alcances del proyecto, es por eso que se determinó usar una bomba igual a la de alimentación de los canales, ya que esta al estar sumergida puede ser puesta en el fondo del tanque, creando un flujo por debajo que ayudará a mantener las partículas que pudieran sedimentarse en movimiento.

### 6.4 BOMBAS PERISTÁLTICAS:

El carácter no lineal del sistema obliga a que los cambios que hagamos en el sistema sean lo más pequeños y precisos posibles, por lo que para la tarea de proporcionar el flujo de ácido al sistema, se hará uso de una bomba peristáltica, ya que proporciona un flujo controlado en el rango de mililitros, a diferencia de una válvula solenoide común. Para el establecimiento de un rango de flujo útil que se encontrara dentro de los rangos a utilizar, se realizaron unas pruebas previas de las condiciones del sistema que se muestra en las Tablas 9 y 10. En estas pruebas se realizó la solución nutritiva y se estudiaron las cantidades de ácido y de base para las cuales el sistema variaba en los rangos deseados, quedando para el caso del ácido 21 mililitros de ácido sulfúrico a 1M para poder variar una y media unidades el pH, siendo ésta cantidad representativa y no por eso

---

definitiva. Este último valor estableció a la bomba peristáltica cuyo flujo ronda de 0 a 100 ml por minuto, como ideal para su implementación en el proyecto.

**Tabla 9: Comportamiento de la solución nutritiva con 10l a 2mS con un pH inicial de 8.02 al agregarle ácido sulfúrico a 1 molar**

<b>Volumen de solución de ácido sulfúrico 1 molar (ml)</b>	<b>Valor de pH medido</b>
0	8.02
1	7.89
2	7.73
3	7.54
5	7.23
7	7.10
9	6.95
12	6.79
15	6.66
18	6.6
21	6.48

Una vez establecido esto se procedió a analizar las posibles opciones basadas en los siguientes criterios:

**Alimentación:** El tipo y magnitud de la fuente de la que se servirá para funcionar




**Consumo:** La corriente requerida por la bomba

**Flujo:** El volumen de líquido procesado en un intervalo de tiempo.

**Precio:** El costo de adquisición.

### 6.5.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE BOMBAS PERISTÁLTICAS:

**Tabla 10: Comparativa bombas peristálticas**

<b>Criterio:</b>	<b>Bomba 1:</b>	<b>Bomba 2:</b>	<b>Bomba 3:</b>
			
<b>Alimentación [V]:</b>	12	6	6
<b>Consumo [mA]:</b>	80	30	30
<b>Flujo [ml/min]:</b>	0-100	0-100	0-60
<b>Precio [\$MXN]:</b>	471	800	431



---

#### 6.4.2 SELECCIÓN DE LA BOMBA PERISTÁLTICA:

En el mercado las distintas opciones accesibles económicamente se encontraban dentro de los rangos descritos en las pruebas, para la selección el flujo sería el criterio más importante, por lo que una bomba peristáltica de la mayor capacidad posible, sería lo ideal para así tener un rango mayor en el cual trabajar, otro factor al tomar en cuenta es que las bombas de agitación y de riego trabajan a 12 volts por lo que por practicidad, la opción uno es la mejor, dejando de lado el consumo, y al ser, además la segunda más económica.

#### 6.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN:

Para la fuente de alimentación se hará uso de una fuente de computadora tradicional debido a que realizar nuestra propia fuente implica una inversión mayor y un trabajo complejo que sale de los alcances del proyecto, además las fuentes de computadora son fáciles de conseguir, tienen un precio muy accesible o se pueden obtener de reciclaje y proporcionan corrientes lo suficientemente altas para alimentar el sistema. Dentro de las características específicas se tiene que proporcionan salidas voltajes de 12v, 5v, y 3.3v, que se prestan para alimentar los actuadores, el controlador y los sensores. En términos de potencia dependen de las características particulares de cada una, sin embargo, las económicas de 450 watts llegan a entregar hasta 35 amperes, lo suficientemente sobrado para nuestro sistema como lo muestra la Tabla 12, lo cual es necesario por los picos de corriente demandados por las válvulas y bombas.

**Tabla 11: Cálculo de la potencia nominal consumida**

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Consumo [W]</b>
Bomba peristáltica	1	1
Bomba de agua	3	10

Sensores ultrasónicos	2	0.02
Sensor de pH	1	0.5
Sensor de conductividad	1	0.5
Microcontrolador	1	0.5
	<b>Total:</b>	12.52

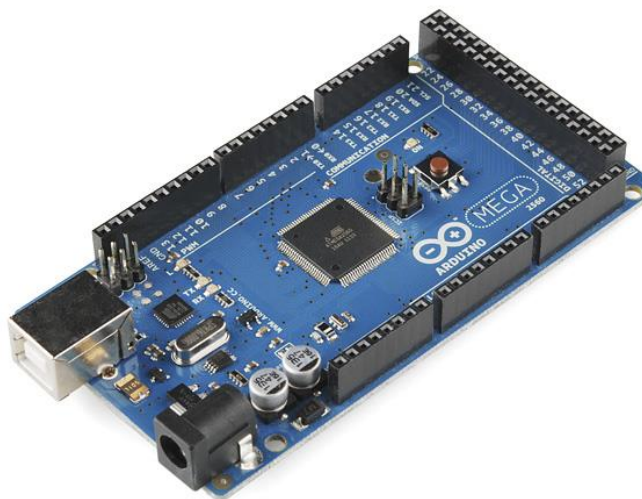
## 6.6 TARJETA DE ADQUISICIÓN:

Para el desarrollo de este proyecto se necesita hacer uso de un dispositivo que permita gestionar todas las señales de entrada de los sensores, para que a su vez ayude a implementar un sistema de control que gestione el correcto comportamiento de las válvulas y bombas. La variación de los parámetros en el sistema no es inmediata, la regulación tanto del pH como de la CE estará condicionada por el tiempo en el que el sensado se estabilice, es por eso que no es necesario usar un controlador que muestree muchas veces por segundo como la DAQ, porque sería un gasto inútil, lo mismo pasa con el PLC, que tiene capacidades sobradas para la aplicación que se desea realizar, por otra parte los voltajes de operación difieren de los voltajes de los demás componentes antes seleccionados, lo que implicaría una etapa de acoplamiento extra, además se tiene que mencionar su elevado costo, por lo que el microcontrolador se alza como la opción más viable para su implementación dentro del sistema, ya que si bien su capacidad de muestreo es limitada, es mucho más barato.

Tomando en cuenta la previa selección de todos los componentes se tiene que el microcontrolador Arduino es la opción más viable ya que tanto la tarjeta UNO como la tarjeta MEGA cuentan con pines digitales y analógicos suficientes y su costo es muy bajo comparado con las otras opciones.

---

Sin embargo, se utilizará una Arduino MEGA que es mostrada en la Figura 31, por si en trabajos futuros se desean añadir más estaciones de cultivo o se comiencen a sensor otras variables.



**Figura 31: Microcontrolador Arduino Mega**

## **6.7 ETAPA DE POTENCIA:**

Para poder hacer correcto uso de las bombas y válvulas dentro del sistema será necesario la utilización de un puente H que se encargue de manejar las señales de accionamiento de cada una de ellas, así como de proporcionarles las corrientes necesarias para su correcto funcionamiento, a continuación se muestra una comparación de las dos opciones más conocidas comercialmente para su posterior análisis y selección:

---

### 6.8.1 ALTERNATIVAS COMERCIALES DE PUENTE H:

**Tabla 12: Comparativa de puente H disponibles**

<b>Criterio</b>	<b>L293</b>	<b>L298</b>
<b>Voltaje Lógico:</b>	2.3-7	4.5-7
<b>Voltaje de Alimentación:</b>	4.5-36	4.8-46
<b>Corriente:</b>	0.6A por canal	2A por canal
<b>Corriente pico:</b>	1.2 A	3A
<b>Protección de diodos:</b>	No	Si
<b>Cantidad de motores:</b>	4	2
<b>Precio [\$MXN]</b>	210	85

### 6.7.2 SELECCIÓN DE PUENTE H:

Para implementar la etapa de potencia se hará uso de un L298 ya que si bien el módulo del L293 ahorra espacio al poder gestionar 4 motores al mismo tiempo, en el caso de la válvula solenoide, trabajaría casi en el límite permitido por canal, y sabiendo que un motor de dc al arranque puede tener una variación alta de corriente, lo ideal es que haya suficiente holgura para garantizar que no haya desperfectos, y esto último nos lo proporciona el L298 con una corriente de hasta 3 amperes pico para gestionar las posibles variaciones y 2 amperes por canal lo que es más que suficiente, además como se puede ver el precio respecto al módulo de L293 es más económico.

---

## 6.8 INTERFAZ GRÁFICA:

La interfaz se encargará de interactuar con el usuario y mostrarle el estado del sistema, así como el historial de su comportamiento, además debe mostrar alarmas en caso de alguna falla. Sólo se tienen dos opciones posibles, usar un software para la creación de la interfaz o programarla, esto último sale de los alcances del proyecto y tomaría tiempo el desarrollarlo, por lo que se optó por usar un software. Se tiene la ventaja de que existe software para crear interfaces fáciles de programar y con muchas herramientas compatibles con distintos tipos de tecnología como es el caso de LabView de National Instruments. Con la ayuda de las herramientas de LabView se pueden realizar interfaces intuitivas haciendo uso de herramientas fáciles de utilizar, además cuenta con complementos que permiten interactuar con el microcontrolador seleccionado, teniendo, además, la capacidad de interactuar con datos y guardarlos en la PC, siendo de gran ayuda al momento de generar la base de datos del cultivo. La ardua tarea que implicaría programar la interfaz por cuenta propia se vuelve un elemento a considerar, al tener en cuenta que la parte medular del trabajo es el control de las condiciones del cultivo, por lo que LabView resulta la opción más viable a implementar.

## 6.9 COMUNICACIÓN A DISTANCIA:

Ya que el controlador debe conectarse con la interfaz gráfica es necesario la implementación de una comunicación entre los dos, existen dos opciones para estas tareas que es la comunicación alámbrica o inalámbrica, la alámbrica está dada por el protocolo de comunicación USB incluido dentro del mismo microcontrolador, el cual usa una comunicación serial para enviar y recibir datos del microcontrolador, o inalámbrica de la cual hay dos tecnologías que pueden ser usadas para la comunicación serial a distancia ampliamente usadas en el desarrollo de proyectos de electrónica como los son Xbee y Bluetooth, la Tabla 14 muestra una comparativa de los protocolos de comunicación donde se analizan los pros y contras de cada una para su posterior selección.

---

### 6.10.1 ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN:

**Tabla 13: Comparativa de comunicación a distancia**

<b>Alternativa:</b>	<b>Cable USB</b>	<b>Xbee</b>	<b>Bluetooth</b>
<b>Alcance:</b>	Más de 10 metros usando cable activo pudiendo	30 metros en espacio cerrado y 100 metros en espacio abierto	5 a 10 metros
<b>Precio [\$MXN]:</b>	200	1400	300
<b>Velocidades de transmisión:</b>	Hasta 60MB por segundo	Hasta 1MB por segundo	Hasta 24MB por segundo

### 6.9.2 SELECCIÓN DE LA COMUNICACIÓN A ADOPTAR:

Como el sistema está pensado para uso doméstico, entonces la distancia no es un tema de vital importancia por lo que se establecen 10 metros como una distancia suficiente necesaria para conectar la computadora desde el sistema hidropónico, hasta un punto interior donde se encontrará el sistema de monitoreo, entonces los 3 son una opción viable sin embargo el precio del Xbee es muy alto, y el Bluetooth parece no tener una garantía plena de funcionamiento debido a que su rango varia de 5 a 10 metros según las condiciones, y ya que el protocolo USB establece un buen funcionamiento a 10 metros usando cable activo, resulta la opción más viable, además de ser la más económica también y será la implementada en el sistema.

La Figura 32 muestra el boceto general de conexión final de los elementos del sistema y cuyo diagrama eléctrico propuesto se encuentra en el Anexo C.

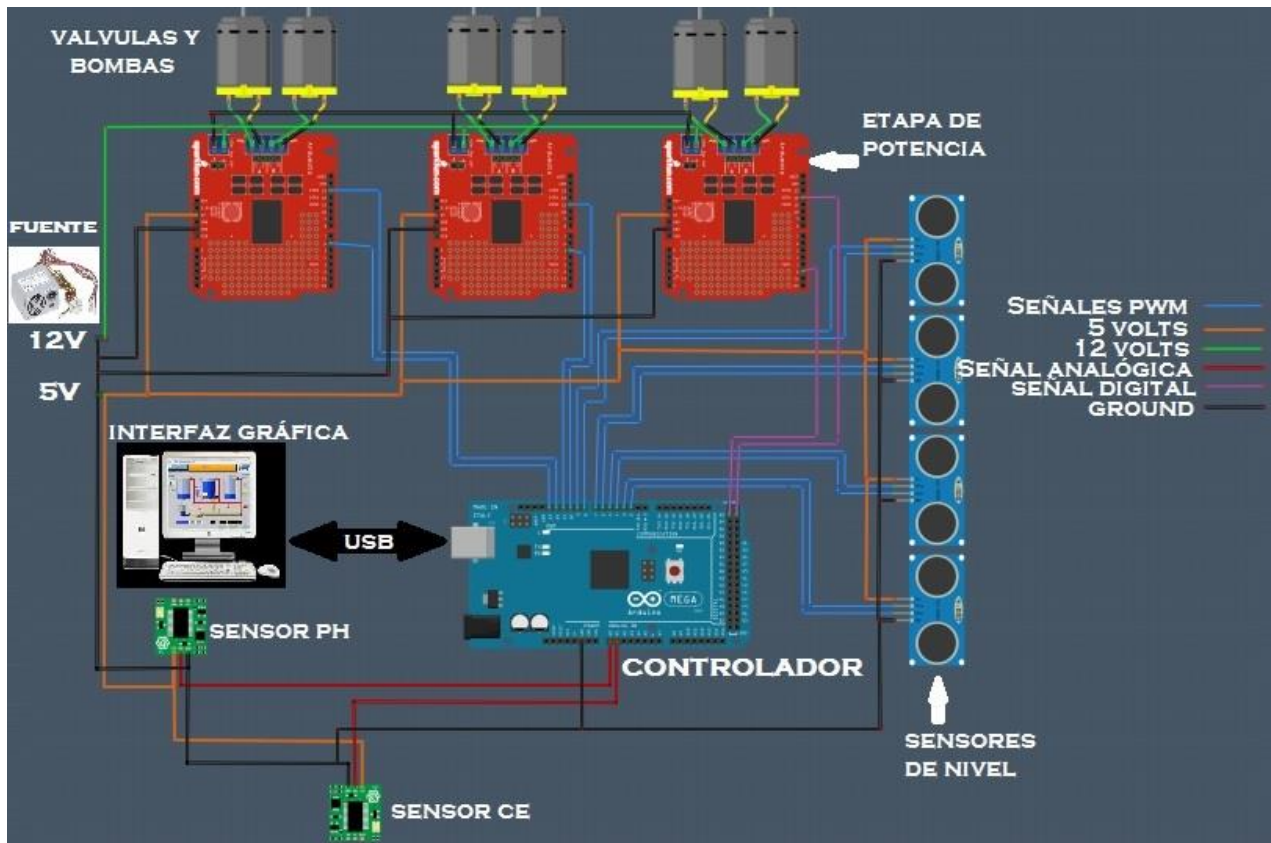


Figura 32: Bosquejo general de la interconexión de los elementos eléctricos del sistema

---

## 7. DESARROLLO:

### 7.1 ENSAYOS CON LOTES DE LECHUGA:

Tal como se desarrolló en la etapa de diseño, se construyó un sistema hidropónico NFT en configuración zigzag vertical (Figura 33). La estructura es un PTR de 2 pulgadas soldado, para los canales se usó PVC con una longitud menor a 16 metros, se pegó con adhesivo de PVC para evitar fugas dentro de los canales, se realizaron las respectivas perforaciones de 3 pulgadas de diámetro, que serían los receptáculos para las canastillas, donde se colocarían las plántulas de lechuga. Se compró un contenedor de plástico de 60 litros que sirve como almacén de la SN.

El sistema se implantó dentro del taller de Trabajo Terminal en las instalaciones de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas como lo ilustra la Figura 34 y 35.

El objetivo de estos ensayos fue observar la planta en el transcurso del tiempo, tomando mediciones diarias de su consumo de SN, su pH y su CE, para así, caracterizar su comportamiento y basar el sistema de control en las reglas obtenidas de este estudio, es por eso, que durante esta etapa sólo se hizo uso de un microcontrolador conectado a los 12v de la fuente de PC, el microcontrolador activaba un puente H al que estaban conectadas las bombas que se encargaban de hacer el riego correspondiente. Las mediciones se realizaron de forma manual utilizando equipo de laboratorio.





**Figura 33: Prototipo de sistema NFT construido**

#### 7.1.1 PRIMER ENSAYO:

Los alcances de este proyecto basados en hidroponía, están establecidos desde que la plántula está ya lista para su implantación dentro del sistema NFT, es por eso que en este ensayo se dejó de lado cualquier tema relacionado con la germinación. Por lo tanto, se adquirió plántula de lechuga en invernaderos de la región, cabe mencionar que en la región se cultivan únicamente variedades del ramo comercial, por lo que es difícil encontrar especies ideales para el desarrollo de un sistema hidropónico normal, así que sólo se consiguió la variedad conocida como Iceberg.

La plántula comercial se encuentra germinada en sustrato, por lo que para su implantación dentro de un sistema hidropónico NFT, es necesario realizar un lavado con cuidado de sus raíces para poder dejarlas limpias y que estén listas para comenzar a absorber nutrientes de la SN. El lavado de las raíces y su implantación dentro del sistema se realizó el día 28 de abril. El volumen de agua inicial se estableció en 24 litros y la SN utilizada fue una fórmula general comercial para hortalizas, vendida por hydroenvironment.



**Figura 34: Sistema NFT implantado dentro de las instalaciones de la UPIIZ**



**Figura 35: Sistema transportado a una ventana en busca de luz solar**

Con el paso de los días, parecía no haber ningún cambio significativo dentro de estos parámetros medidos, a excepción de ligeros cambios en el volumen de solución. Se pensó en un comportamiento normal, debido a la naturaleza del índice de crecimiento de la lechuga, que muestra un desarrollo mínimo durante las primeras dos o tres semanas de desarrollo, además

---

tomando en cuenta el consumo final de agua por planta que ronda los 0.3 litros diarios. parecía no ser un resultado anormal.

Fue con el paso de los días que se comenzaron a ver problemas notorios en la fisiología de las plantas, el tallo parecía crecer sin medida mientras que la hoja era la misma desde la implantación, el tallo creció a un grado en que ya le era imposible sostener el peso de la hoja tal como lo muestra la Figura 36:



**Figura 36: Plántula con crecimiento anormal**

Dentro de la hidroponía un buen indicador del estado de salud de una planta es su raíz, ya que ésta debe ser suficientemente grande y debe mostrar una tonalidad blanca; la raíz de las plantas del sistema implantado tomó un tono café turbio, con indicios de haber adquirido un hongo y su crecimiento fue prácticamente nulo como lo muestra la Figura 37.



**Figura 37: Raíz de la plántula con indicios de problemas**

Fue en este punto cuando se buscó la ayuda de un profesional y se determinó que las plantas del sistema habían sufrido un fenómeno conocido como etiolación, que consiste básicamente en carencia de luz. A pesar de ser un sitio iluminado, la luz dentro del taller de trabajo terminal resultaba insuficiente, y las plantas tendían a alargar su tallo en busca de luz, tal como lo hacen al germinar, y al no encontrarla, el crecimiento del tallo jamás se vio interrumpido hasta que llegó a un punto de no retorno y la planta se echó a perder.

Para resolver este problema se buscó dotarlas de luz, acercándolas a una ventana que se encontraba con luz de sol directa en el taller, sin embargo, se observó a la brevedad un marchitamiento general de las plantas, por lo que se decidió retirarlas. Al final se pudo constatar que el espacio elegido para desarrollar el sistema no era el idóneo.

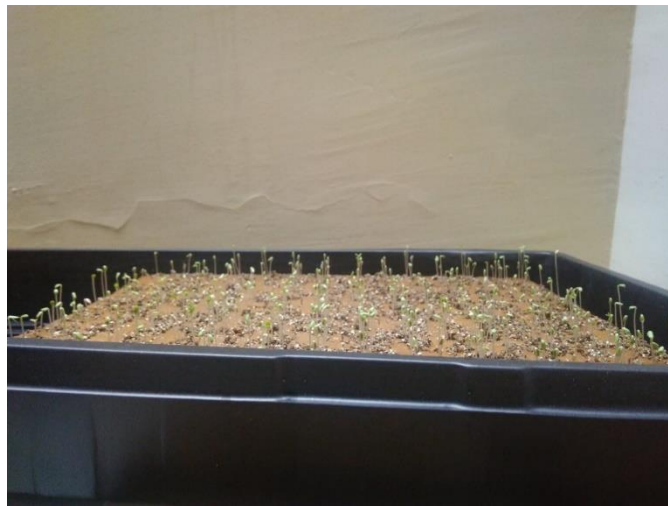
Para el caso de la SN en el tiempo que duró el ensayo, no se observó ninguna manifestación de algas, lo que nos habla de que el movimiento generado por los flujos turbulentos en los cambios de sección de la tubería de PVC estaba proporcionándole suficientemente oxígeno al agua, lo cual es una buena señal.

---

### 7.1.2 SEGUNDO ENSAYO:

Establecido que el espacio elegido dentro de la unidad no era el idóneo se gestionó un espacio en un invernadero dentro de la unidad académica de agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas, a cargo del Dr. Alfredo Lara Herrera. Bajo su experiencia en el ramo de la hidroponía se determinó comenzar un lote totalmente desde cero, es decir desde su germinación, para lo cual se adquirieron semillas de la especie Vulcan, se procedió a realizar su germinado dentro de foami agrícola que al ser un sustrato totalmente inerte permite garantizar inocuidad para la raíz, además de que dotaba de la posibilidad de ver el estado de salud de la raíz durante su germinación.

El primer lote de germinado se sembró el 4 de septiembre y se colocó dentro de un espacio iluminado durante una parte del día, como se ilustra en la Figura 38, sin embargo, se volvió a presentar el fenómeno referido en el primer ensayo, la etiolación no permitió un desarrollo correcto de la planta, por lo que se determinó sembrar un segundo lote y colocarlo recién germinara dentro del invernadero, para así garantizar condiciones de luz idóneas.

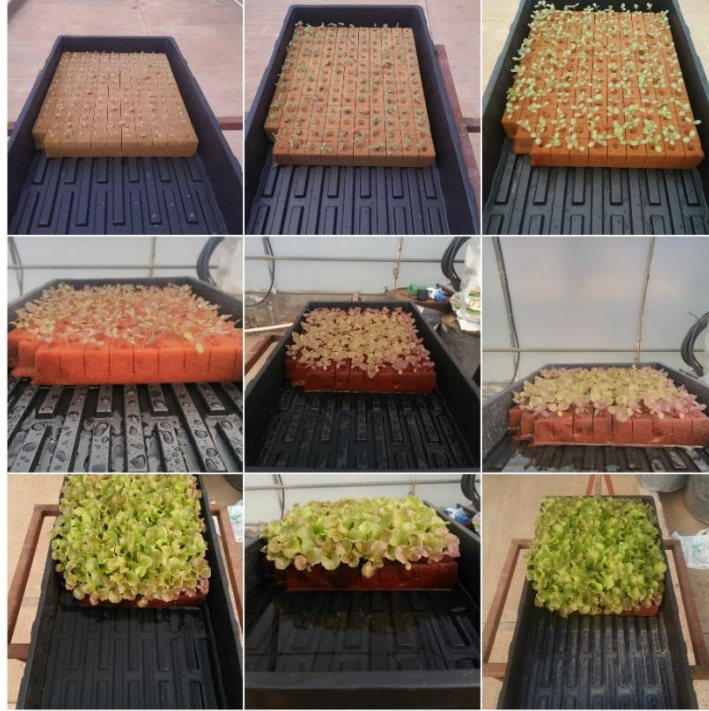


**Figura 38: Etiolación presentada en el primer lote sembrado en foami**

---

Se sembró una vez más, usando foami agrícola el día 29 de septiembre y se procedió a implantarse inmediatamente en el invernadero una vez germinada la planta, se pudo constatar un cambio significativo respecto al primer lote, pues el desarrollo del tallo se detuvo dando lugar a una hoja de tamaño considerable que se desarrolló con el paso del tiempo. Si bien, la literatura establece un plazo de dos a tres semanas desde la germinación para que una planta pueda ser trasplantada dentro de un sistema hidropónico, ya que se espera que en este tiempo, cuente con hojas de un tamaño entre los 8 y 10 centímetros de largo, el lote sembrado parecía llevar un ritmo de crecimiento lento, debido probablemente a que, en este lapso, la iluminación dentro del invernadero se vio seriamente afectada por periodos lluviosos, la evolución de la germinación se muestra en la Figura 39.

Al final, pasados 28 días se tenía ya una plántula con el largo de hoja requerido, sin embargo, pudo notarse que el crecimiento de la raíz fue prácticamente nulo, como se muestra en la Figura 40, esto debido al hecho de que el foami provocaba que la planta no creara raíz, ya que no tenía la necesidad de buscar agua por debajo de sí misma, esto representó un gran problema ya que el tubo de PVC utilizado era de 4 pulgadas y la canastilla solo alcanzaba una profundidad de 2 pulgadas, por lo que era imperativo contar con plántulas que tuvieran al menos unos 2.5 centímetros de raíz. El trasplante se llevó acabo atravesando la planta por la canastilla obligándola a tocar la SN, sin embargo, la hoja quedaba dentro del tubo de PVC en su totalidad y la planta terminó muriendo debido a la escasez de luz y a la falta de espacio en la canastilla.



**Figura 39: Desarrollo de la plántula a lo largo de un mes**



**Figura 40: Plántula con raíz prácticamente inexistente**

---

### 7.1.3 TERCER ENSAYO:

Para el tercer ensayo, con la premisa del tiempo, fue necesario comprar plántula una vez más, consiguiéndose la especie comercial conocida como iceberg, y realizar el mismo proceso de lavado de raíz del primer ensayo, además se hizo uso de una SN propia compuesta de los siguientes elementos:

**Tabla 14: Componentes de la SN para el tercer ensayo**

Elemento:	Miliequivalentes por litro:
Nitrato de calcio	6
Nitrato de potasio	5.5
Sulfato de potasio	1
Sulfato de magnesio	2.5
Fosfato monopotásico	1.5
Micronutrientes	0.6

Las plántulas adquiridas fueron trasplantadas el día 12 de noviembre y a pesar de que la planta quedaba un poco metida entre la tubería de PVC, se pudo ver un desarrollo normal en los siguientes días. La Figura 41 ilustra como la hoja apenas podía sobresalir del tubo. Al paso de los días el desarrollo comenzó a ser notorio, tal como lo muestran las Figuras 42, 43 y 44.





**Figura 41: Día del trasplante de las plántulas al sistema NFT.**



**Figura 42: Desarrollo de las plantas dos semanas después del trasplante.**



**Figura 43: Desarrollo de las plantas 3 semanas después del trasplante.**

Para la tercer semana, se tenían plantas de lechuga con una hoja de 15 centímetros de largo y 10 centímetros de ancho en promedio, y una raíz que rondaba los 15 centímetros de largo, lo que nos hablaba de un desarrollo óptimo hasta ese momento, tal como lo muestra las Figuras 43 y 44, sin embargo, recién empezada la cuarta semana, un frente frio azotó la región, alcanzándose temperaturas extremas que aún dentro del invernadero, lograron congelar la SN y las raíces húmedas de las plantas, lo que generó un impacto en éstas que, aunado a las bajas temperaturas y a la carencia de sol en los días posteriores, propiciaron la muerte de las plantas dejándolas a la mitad de su desarrollo como se muestra en las Figura 45 y 46.



**Figura 44: Desarrollo antes de las condiciones climatológicas adversas**



**Figura 45: Planta después de las condiciones meteorológicas adversas**



**Figura 46: Raíces afectadas por las condiciones meteorológicas.**

Ante la llegada de la época invernal, las altas posibilidades de nuevas heladas, y la falta de equipamiento para poder mantener una temperatura adecuada dentro del invernadero, se tomó la decisión de no implantar más lotes en del sistema y usar la información recabada dentro de las 3 semanas de desarrollo y la presente en la literatura para establecer las condiciones a tomar en cuenta para el control.

---

## 7.2 DISEÑO DEL CONTROLADOR:

El controlador del sistema tiene como propósito, regular las condiciones de la SN en términos de pH y CE. Con los ensayos realizados, se determinaron varios hechos importantes a considerar en el desarrollo del controlador:

- La planta absorbe considerablemente mucha más agua que nutrientes durante su desarrollo, reduciendo así el volumen de la solución y generando una concentración de sales que se traduce en una CE cada vez más alta, resaltando el hecho de no haber necesidad de reponer nutrientes bajo las condiciones en las que se instaló el cultivo.
- El comportamiento del pH se verá afectado por la fisiología de la planta en términos de su nutrición, ya que el uso de  $N-NH_4^+$  genera una producción de iones hidrogeno que se traduce en una disminución del pH, mientras que la utilización de  $N-NO_3^-$  en la solución nutritiva, provoca la producción de iones hidroxilo, lo que se traduce en una elevación del pH, este último caso fue el desarrollado en el sistema, por lo que el pH tendió a incrementar como era esperado.
- Se espera que durante un desarrollo normal, el consumo por cada planta al final del ciclo ronde los 0.3 litros al día, es decir unos 17 litros diarios para el caso del sistema completo, al inicio del ciclo los consumos son mínimos y se van incrementando hasta llegar al consumo antes mencionado,
- El cambio es gradual en el sistema y no implica un control continuo en el tiempo, por lo que resulta necesario regular diario, una vez al final del día y no cada hora.
- El agua utilizada para realizar la reposición de volumen en el sistema es extraída directamente de un pozo profundo de la zona, cuya conductividad es de 0.45mS, es decir cuenta con minerales propios, y cuyo pH es de 7.9. Por lo que para cada reposición de agua se espera una aportación de minerales al sistema y una elevación del pH.

---

Para realizar la regulación de los parámetros antes mencionados, se propone un controlador difuso en lazo abierto, debido a que se supone se conoce el comportamiento del sistema ante diferentes entradas y no se espera que el controlador se retroalimente y verifique su estado actual, lo que se busca es evitar oscilaciones en el sistema. Se sabe que el comportamiento del pH usando nitrógeno en forma de nitratos es ascendente, el retroalimentar el sistema implicaría que al obtener un valor por debajo del setpoint, es decir más ácido de lo que se requiere, el sistema debería reaccionar y aplicar una base, y si el valor medido se encuentra por arriba del setpoint volvería a aplicar un ácido, así hasta lograr estabilizarse. Si bien lo deseable es su estabilización, este comportamiento oscilatorio resulta indeseado debido a que cada que se añade ácido o base, se aportan iones al sistema incrementando su CE y la concentración de estos iones en específico en la solución, por lo que esta aportación debe ser lo más mínima posible ya que la CE está siendo afectada a la vez por la presencia de minerales del agua de reposición y puede generarse a la larga una concentración de sales que cause un desbalance entre los nutrientes que requieren las plantas.

### 7.2.1 VARIABLES DEL SISTEMA:

Para el desarrollo del controlador difuso se tomarán en cuenta 3 variables de entrada: Nivel de solución, Conductividad, y pH y para la salida tendremos dos variables: Agua y Ácido.

Para el caso de las variables de salida se tomaron en cuenta dos factores. El primero fue el comportamiento del sistema ante diferentes entradas, para esto se realizó un estudio a escala en el cual se estudiaron diferentes volúmenes de SN, con diferentes pH's y diferentes conductividades para determinar que entradas llevaban al sistema al punto deseado, la realización de este estudio permitió definir un caudal a utilizar de 0 hasta 20 litros para reponer el agua, y un caudal de 0 a 150 ml para llevar el pH al punto deseado.

El segundo punto a tomar en cuenta fue el rendimiento real de las bombas ante las condiciones en las que se encontrarían, las bombas peristálticas utilizadas establecían de fábrica un caudal de 0 a 100 ml/min, sin embargo, en términos reales alimentándolas a 12 volts manejaban un caudal de

---

60ml/min, mientras que la bomba de agua establecía de fabrica un caudal de 4l/min y tenía un caudal real de 2l/min.

Para todas las variables se optó por simplificar al máximo las operaciones realizadas por el controlador por lo que se determinó usar funciones trapezoidales y triangulares, trapezoidales en los extremos ya que definen una pertenencia máxima a partir de un punto dado y triangulares en medio para definir valores concretos.

#### 7.2.1.1 NIVEL:

Al ser un control diario al final del día sobre las condiciones de la SN, podemos deducir que el nivel mínimo de SN que se alcanzará diariamente será de 80 litros, ya que 20 litros es el volumen máximo que se espera consuman las plantas en 24 horas, por lo que las funciones de membresía que definen esta variable se colocaron en un rango desde 70 hasta 110, dándole un margen de 10 litros para tener un poco más de holgura. Se definieron 5 funciones de membresía y sus etiquetas, como se muestra en la Figura 47.

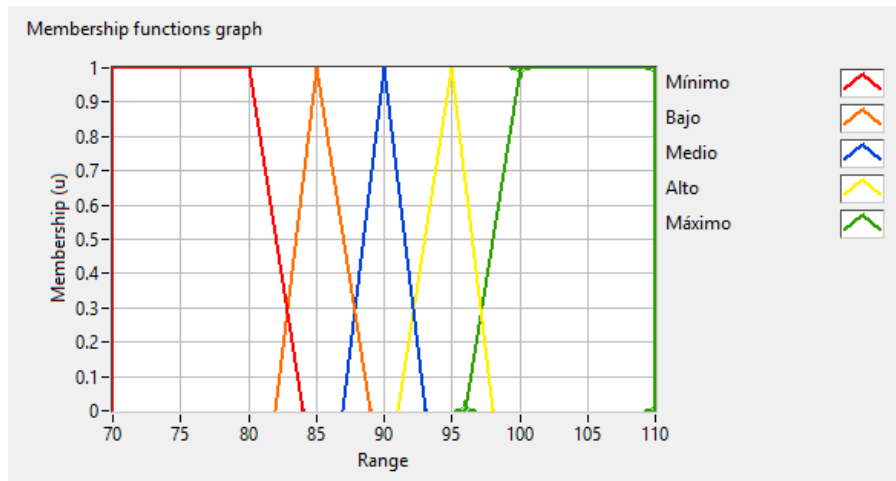


Figura 47: Funciones de membresía para el nivel de solución nutritiva

### 7.2.1.2 CONDUCTIVIDAD:

La CE requerida por el cultivo se estableció en 1.6mS por lo que las funciones de membresía debían estar en torno a esta CE deseada, sin embargo, como se sabe que la CE tenderá a subir a lo largo del tiempo, se estableció un rango de 1.3 hasta 2.2, abarcando más funciones de membresía para las conductividades altas. Se definieron 5 funciones de membresía y sus respectivas etiquetas como se muestra en la Figura 48:

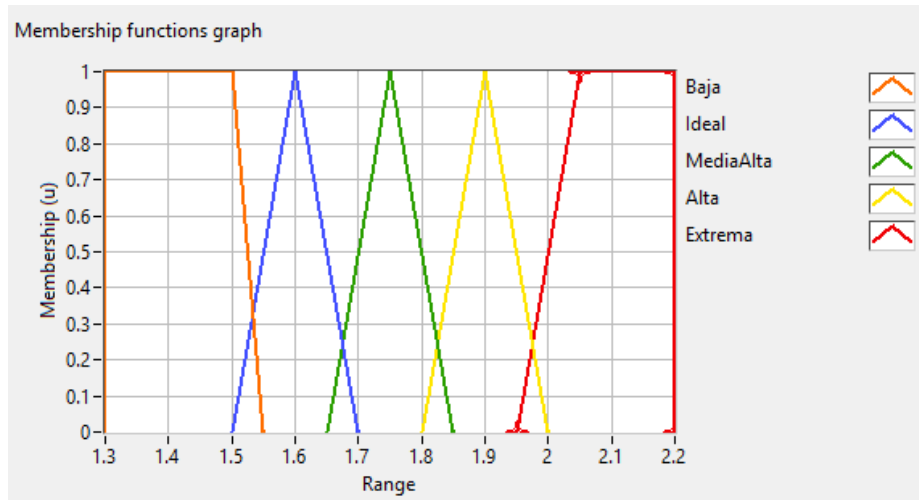
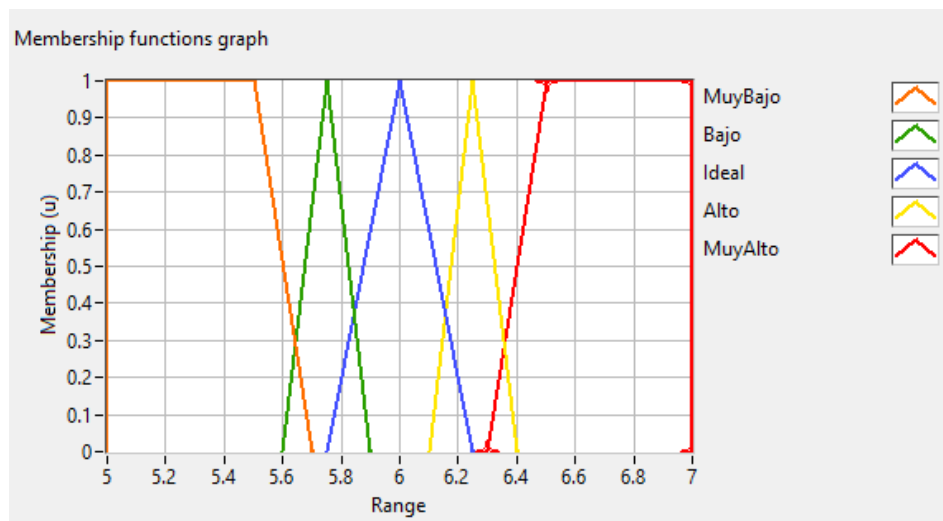


Figura 48: Funciones de membresía para la Conductividad Eléctrica

### 7.2.1.3 pH:

Tomando en cuenta la mayor disponibilidad de los nutrientes en un rango de pH establecido entre 5.5 y 6.5, se decidió establecer 6 como el setpoint de pH para el cultivo y se procedió a definir las funciones de membresía que regirían esta entrada del sistema. Como se puede apreciar en la Figura 49 se definieron 5 funciones de membresía con sus respectivas etiquetas, para el rango en el que se espera el pH fluctue.

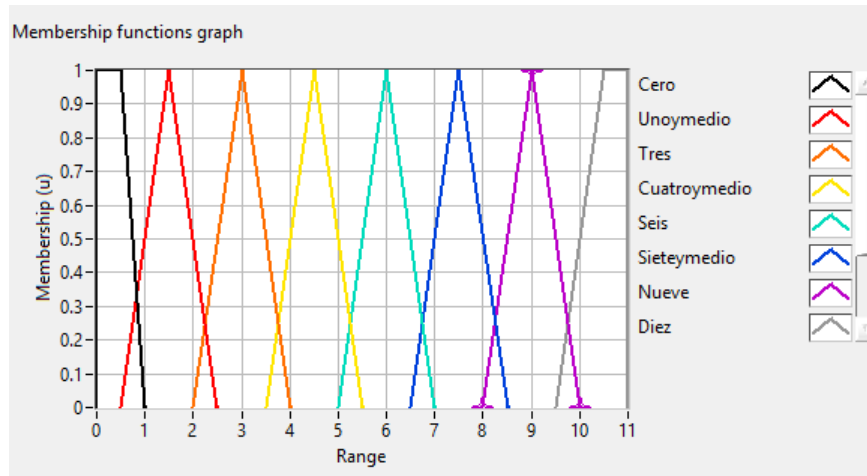




**Figura 49: Funciones de membresía para el pH**

#### 7.2.1.4 REPOSICIÓN DE AGUA:

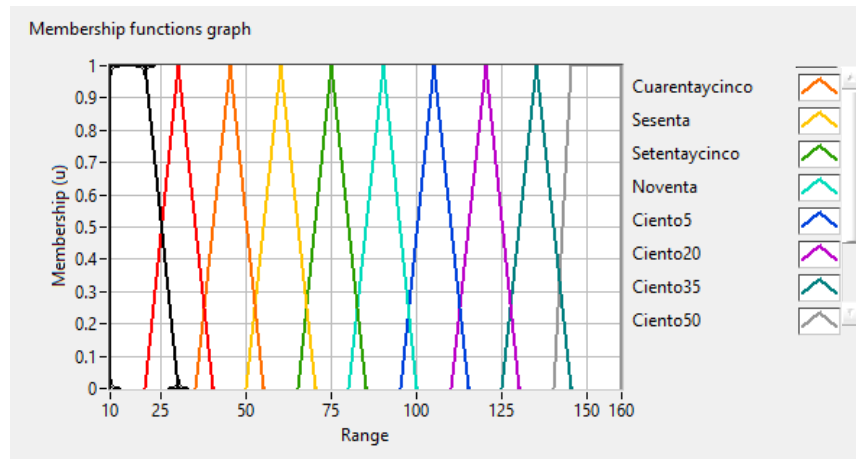
Tomando como punto de partida la información anterior se generaron las funciones de membresía para la reposición del agua. Debido a que el caudal está definido por el tiempo que la bomba se encuentra activada, los valores de la variable se establecieron en minutos y en un rango de 0 a 11, que en términos de litros son de 0 a 22. Se establecieron 8 funciones de membresía y sus respectivas etiquetas como se muestran en la Figura 50:



**Figura 50: Funciones de membresía para la reposición de agua**

#### 7.2.1.5 ACIDO A AGREGAR:

La cantidad de ácido que ingresará al sistema estaría también definida por el tiempo que la bomba peristáltica se encontrará encendida, por lo cual, tomando en cuenta el caudal máximo necesario y el caudal real otorgado se estableció un tiempo de 0 a 150 segundos como rango para la variable. Se definieron 10 funciones de membresía y sus respectivas etiquetas como se muestra en la Figura 51:



**Figura 51: Funciones de membresía para la bomba de acido**

## 7.2.2 REGLAS:

Con base en el comportamiento esperado del sistema, las pruebas a escala del sistema ante diferentes entradas y la información del comportamiento de las bombas, se procedió a crear la serie de reglas de control que regirían el sistema. Se usó el operador AND como conector y se realizó la Tabla 15 para relacionar cada entrada con cada salida.

**Tabla 15: Reglas de control inferidas de los estudios**

1	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
2	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
3	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
4	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
5	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
6	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
7	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
8	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
9	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
10	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
11	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
12	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
13	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco

14	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
15	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Ciento20
16	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Sieteymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
17	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Sieteymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
18	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Sieteymedio	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
19	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Sieteymedio	AND	ÁCIDO ES:	Noventa
20	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Sieteymedio	AND	ÁCIDO ES:	Ciento35
21	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
22	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
23	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
24	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
25	IF	NIVEL ES:	Mínimo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento50
26	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
27	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
28	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
29	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
30	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
31	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
32	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince

33	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
34	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
35	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
36	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
37	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
38	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Treinta
39	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
40	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Ciento20
41	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Quince
42	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Quince
43	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
44	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
45	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Ciento50
46	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
47	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
48	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
49	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
50	IF	NIVEL ES:	Bajo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento50
51	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince

52	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
53	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
54	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
55	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
56	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
57	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
58	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
59	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
60	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
61	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
62	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Quince
63	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Treinta
64	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
65	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cuatroymedio	AND	ÁCIDO ES:	Ciento20
66	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Quince
67	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Quince
68	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
69	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
70	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Nueve	AND	ÁCIDO ES:	Ciento50

71	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
72	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Quince
73	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
74	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
75	IF	NIVEL ES:	Medio	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Diez	AND	ÁCIDO ES:	Ciento50
76	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
77	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
78	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
79	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
80	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
81	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
82	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
83	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
84	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
85	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
86	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
87	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
88	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
89	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Noventa

90	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Ciento35
91	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
92	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
93	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
94	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Noventa
95	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Ciento35
96	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
97	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Quince
98	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Cuarentaycinco
99	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Noventa
100	IF	NIVEL ES:	Alto	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Seis	AND	ÁCIDO ES:	Ciento35
101	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
102	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
103	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
104	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
105	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Baja	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
106	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
107	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
108	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince

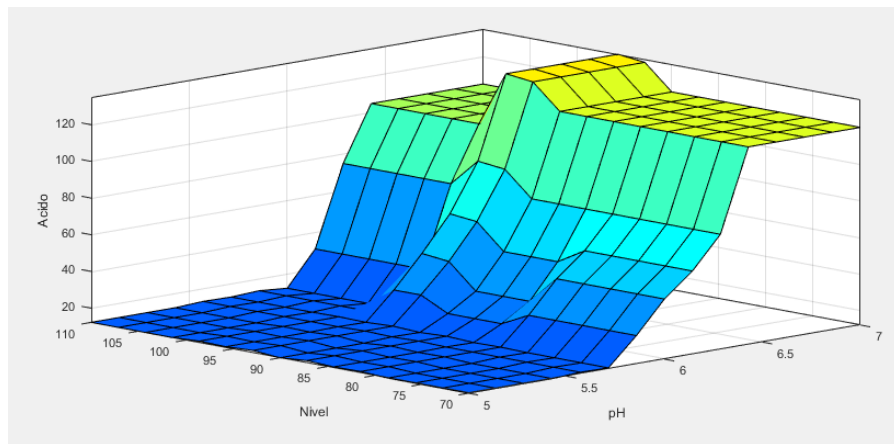


109	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
110	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Ideal	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
111	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
112	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
113	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
114	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
115	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	MediaAlta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
116	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
117	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
118	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
119	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
120	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Alta	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5
121	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyBajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
122	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Bajo	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
123	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Ideal	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Quince
124	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	Alto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Setentaycinco
125	IF	NIVEL ES:	Máximo	AND	CE ES:	Extrema	AND	pH ES:	MuyAlto	THEN	AGUA ES:	Cero	AND	ÁCIDO ES:	Ciento5

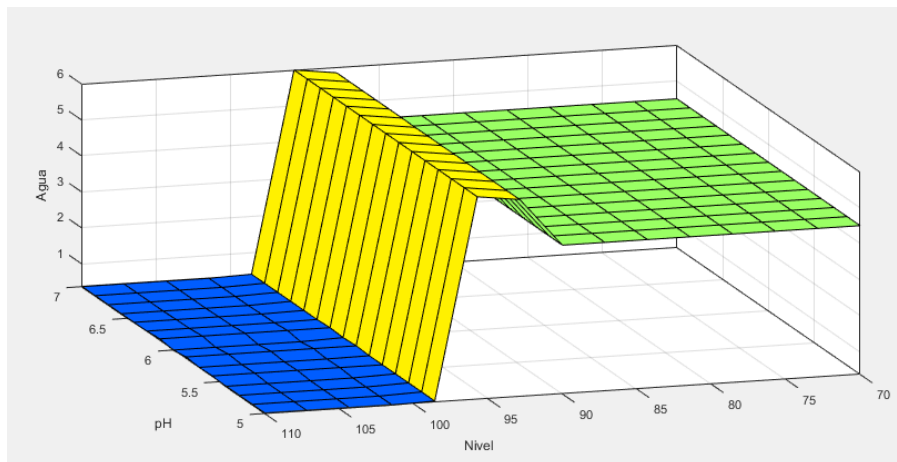
---

### 7.2.3 SIMULACIÓN:

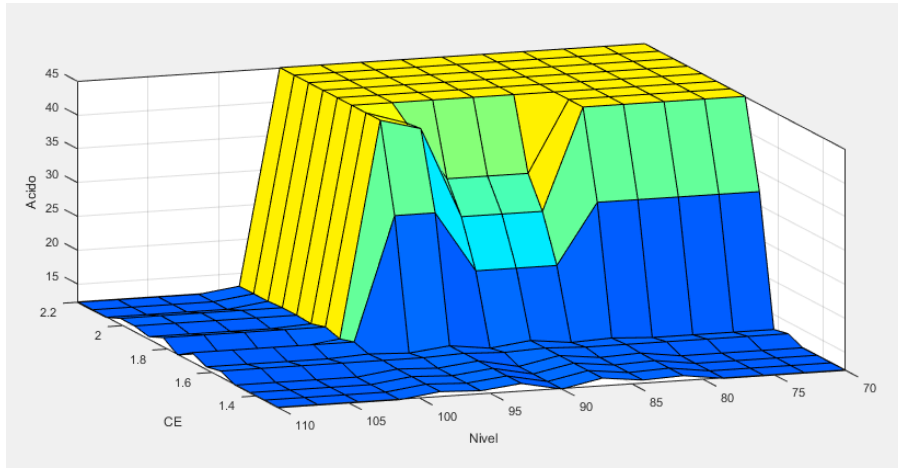
Para comprobar el funcionamiento del control difuso diseñado se hizo uso de software especializado donde se introdujeron las variables y las reglas de control. Se obtuvieron sus respectivas superficies de control que muestran la relación que existe entre las diferentes entradas al sistema y su respectiva respuesta para cada variable de salida indicadas en las Figuras 52 a 57.



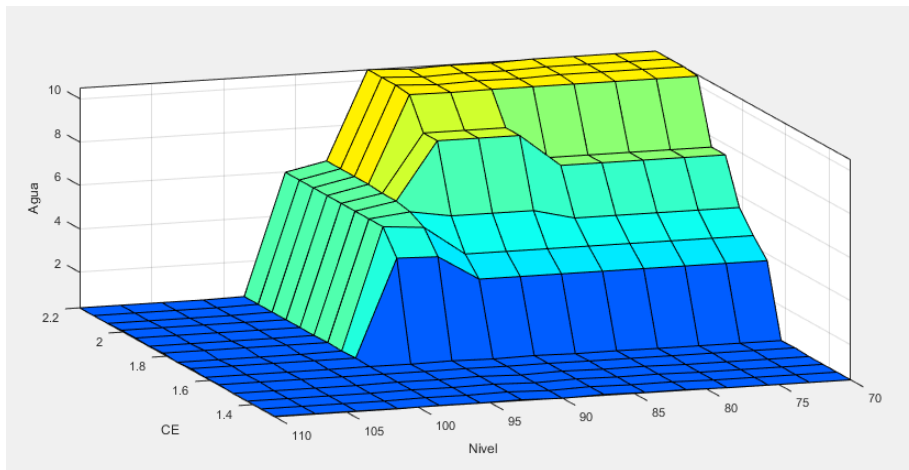
**Figura 52: Superficie de control de la relación pH-Nivel-Ácido**



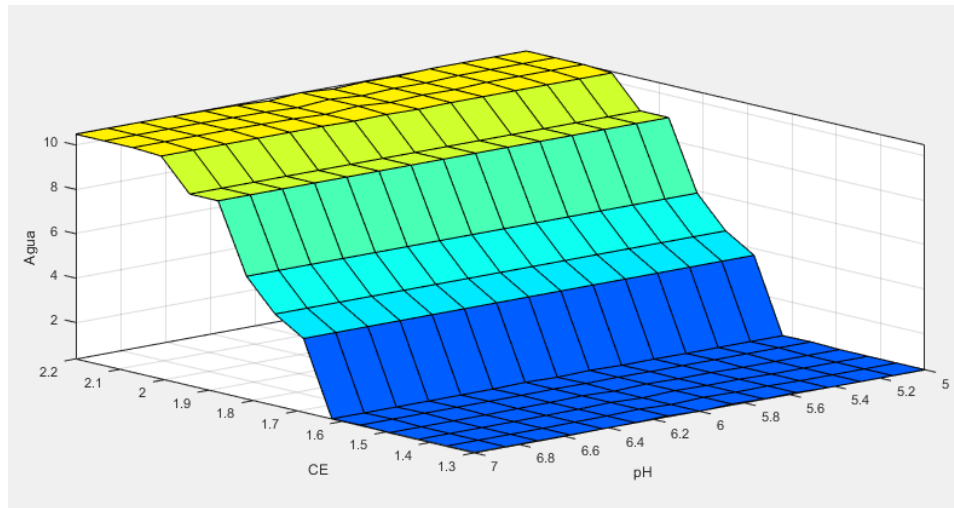
**Figura 53: Superficie de control de la relación pH-Nivel-Agua**



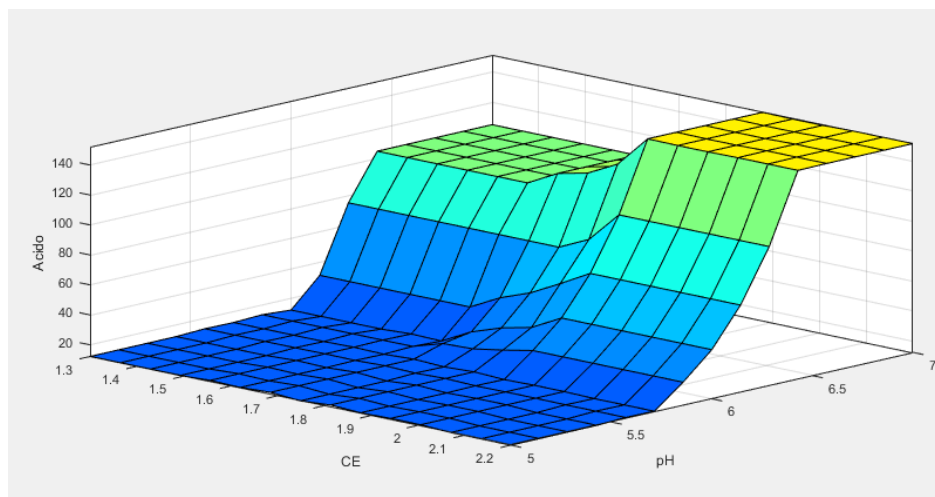
**Figura 54: Superficie de control de la relación CE-Nivel-Ácido**



**Figura 55: Superficie de control de la relación CE-Nivel-Agua**



**Figura 56: Superficie de control de la relación CE-pH-Agua**



**Figura 57: Superficie de control de la relación CE-pH-Ácido**

Las superficies mostraron un comportamiento esperado por lo que se procedió a establecer valores de entrada para visualizar el valor de cada salida defuzzificada y se pudo corroborar que las salidas del sistema difuso, entregaban también valores esperados correspondientes a cada una de las superficies ante diferentes combinaciones y condiciones en las entradas.

## 7.2.4 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DIFUSO:

Para la implementación del desarrollo difuso se hizo uso de la herramienta preinstalada de lógica difusa que está presente en el entorno de programación LabView, el desarrollo del programa completo tomaba mucho espacio de código por lo que fue necesario dividirlo en partes por medio de Sub-Vi's, la estructura general de la programación del sistema difuso se muestra en la figura 58. De izquierda a derecha: primero se definen con código las funciones de membresía, estas funciones de membresía entran como parámetro en la función "Crear Variable" que es la que se encarga de agrupar todas las funciones de membresía y darles un nombre para crear una variable en el dominio difuso, a esta última variable se le asignan como parámetros los rangos en los que trabaja. La función que se encarga de crear el sistema difuso como tal, es la función "New Fuzzy System", en ella se agrupan por medio de arreglos las variables de entrada, salida, las reglas y se especifica el método de defuzzificación empleado. Para finalizar, con la función "Save fuzzy System" se guarda el sistema creado en un formato ".fs" para poder ser empleado posteriormente en el controlador.

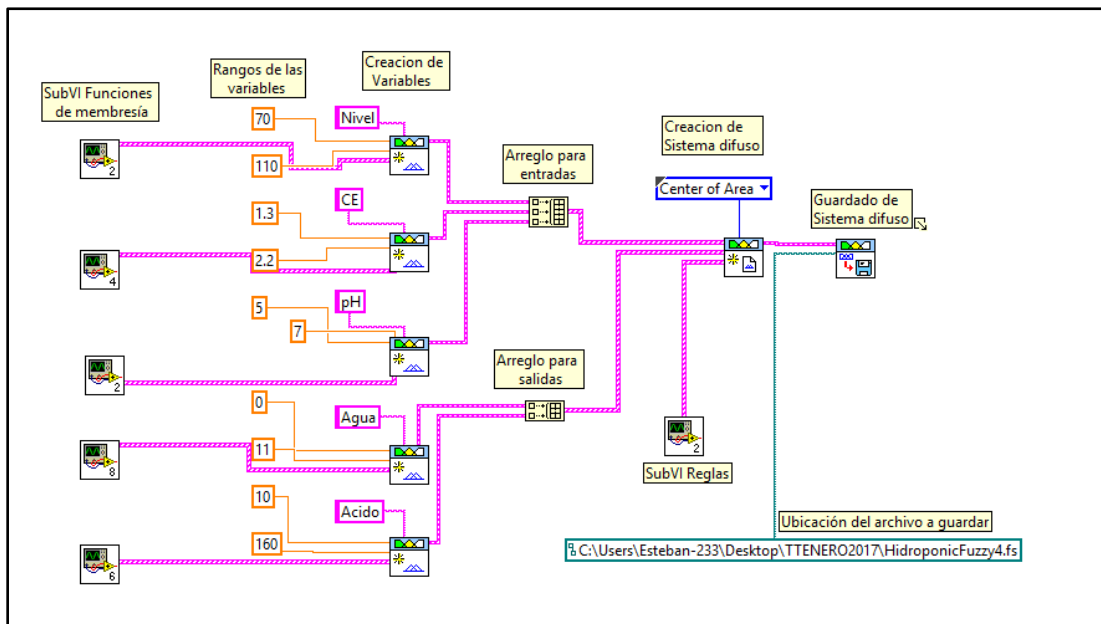
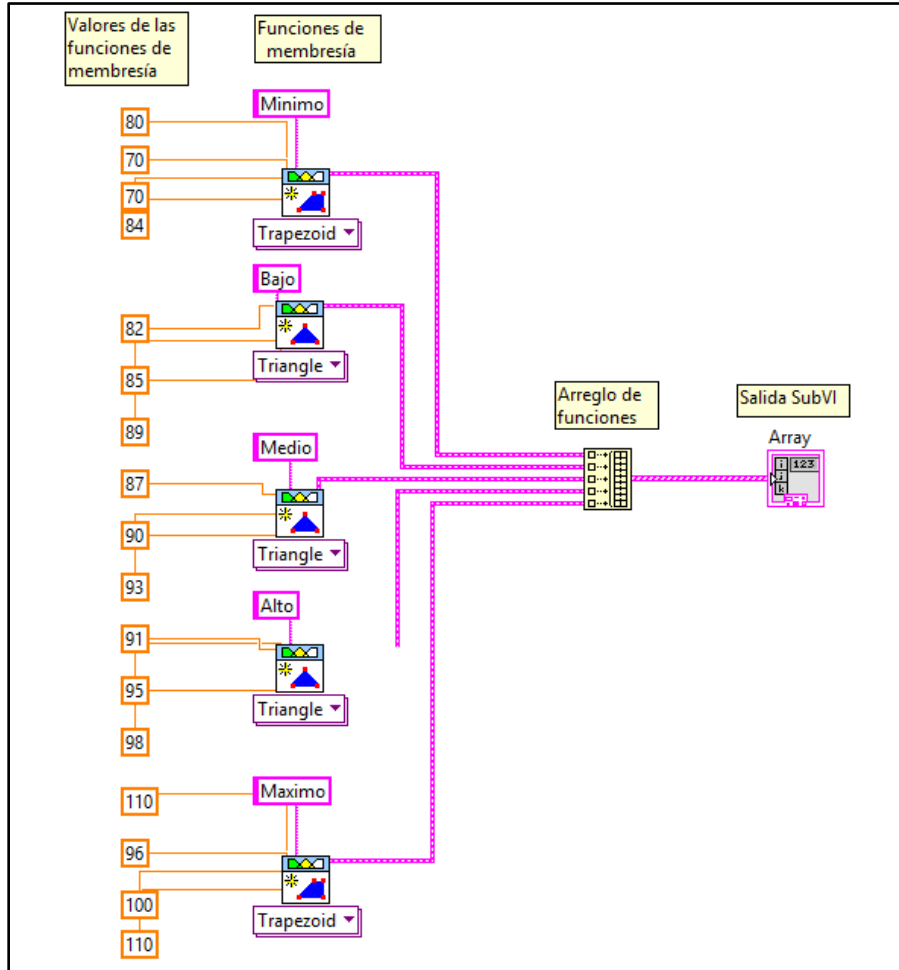


Figura 58: Vista general del programa de la creación del sistema difuso

Las funciones de membresía fueron definidas una a una para cada variable con la ayuda de la función “Membership function”, en la Figura 59 se muestra la programación dentro de un subVI de la variable Nivel, tal como se estableció en la definición de las variables en la sección 7.2.1, se definen sus límites y geometrías y se agrupan para entrar como parámetros de la siguiente etapa como ya se mostró anteriormente en la Figura 58.



**Figura 59: Ejemplo de creación de la variable Nivel para el sistema difuso**

Para el caso de las reglas del sistema difuso, se hizo uso de la función “Create antecedent” para definir los antecedentes y “Create consequent” para definir las consecuencias de cada regla, para

---

la programación en particular de este SubVI fue necesario poner vital atención en el orden en el que agrupamos en un arreglo cada variable y cada función de membresía.

Como se puede ver en los antecedentes entran dos números como parámetros, estos números representan una posición dentro de un arreglo, para el caso del antecedente que se encuentra en la esquina superior izquierda, el cero de arriba representa la variable que se encuentra en la posición cero en el indexado que se hace al crear un arreglo de variables de entrada como se mostró anteriormente en la Figura 56, y el cero que se encuentra más abajo representa la función de membresía que se quiere representar en la regla y que está definida por la posición en que se colocó en el arreglo del SubVI de la creación de la variable como se mostró en la Figura 57. Para el caso de las consecuencias se tiene el mismo procedimiento, pero para las variables de salida, al final se hace uso de la función “Create Rule” a la cual entran como parámetros un arreglo con los antecedentes y las consecuencias antes definidas y se especifica el operador que las une que fue definido como AND durante el desarrollo.

Cabe mencionar que el código que se muestra en la Figura 60, es sólo el que define una regla, y que se tuvieron que realizar las 125 reglas definidas en el desarrollo del sistema difuso, todas y cada una de ellas indexarlas en un arreglo para que fuera posible que entraran como parámetro de la función “Create Rule” y por lo extenso del código no fue posible mostrar esta etapa completamente.

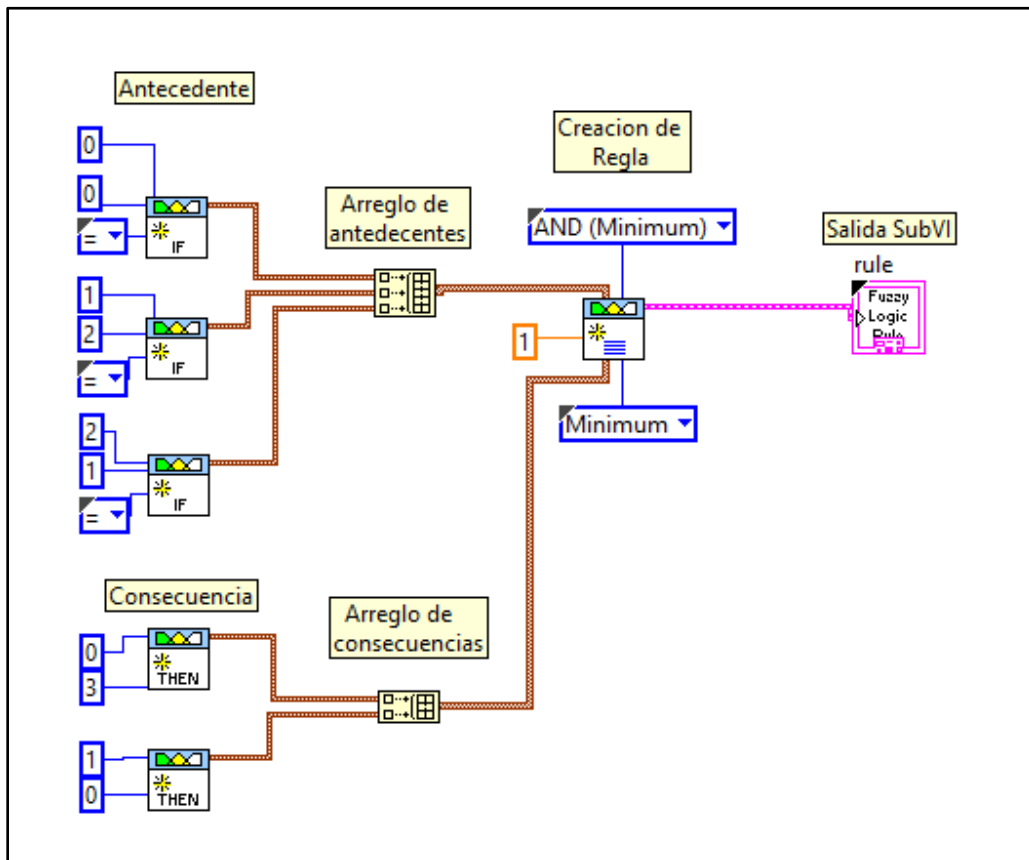


Figura 60: Ejemplo de creación de una regla de control del sistema difuso

### 7.3 RIEGOS:

No existe un consenso general respecto a cuántos tienen que ser los riegos en un sistema hidropónico y a cuál debe ser su duración, ya que existen propuestas que van desde los 5 minutos cada hora hasta las 24 horas al día, lo que sí es un hecho es que los procesos fisiológicos de la planta suceden durante el día, mientras se encuentra expuesta a la luz solar. Es por eso que se decidió iniciar los riegos a partir de las 7 de la mañana y terminarlos a las 8 de la noche, suponiendo que entre estas horas existe siempre luz solar. La frecuencia se estableció cada hora con una duración de 15 minutos, buscando disminuir lo más posible el consumo energético del sistema.



### 7.3.1 PROGRAMACIÓN DE TEMPORIZADOR:

Labview cuenta ya con herramientas en términos de tiempo establecidas como la función “Get Date and Time” que es capaz de retornar el día y la hora en un tipo de dato llamado “Time Stamp” que maneja el software. Sin embargo, a la hora de implementar el temporizador para los riegos, ocurría que la función no retornaba básicamente nada si se decidía ignorar el día como dato, por lo que se dejó de lado trabajar con este tipo de dato y en su lugar se convirtió a String para poder realizar el temporizador. Así sólo fue necesario tomar el elemento de la cadena que era de interés y medir su tamaño en bytes para saber qué número representaba y tener una manera de ver los minutos y horas transcurridos, así si la hora obtenida por la función “Get Date and Time” estaba entre las 7 de la mañana y las 8 de la noche activaría la rutina de riegos, que se basa en ver si el programa se encuentra en los primeros 15 minutos de cada hora, para así activar una salida que prenda la bomba de riegos. El código se muestra en la Figura 61.

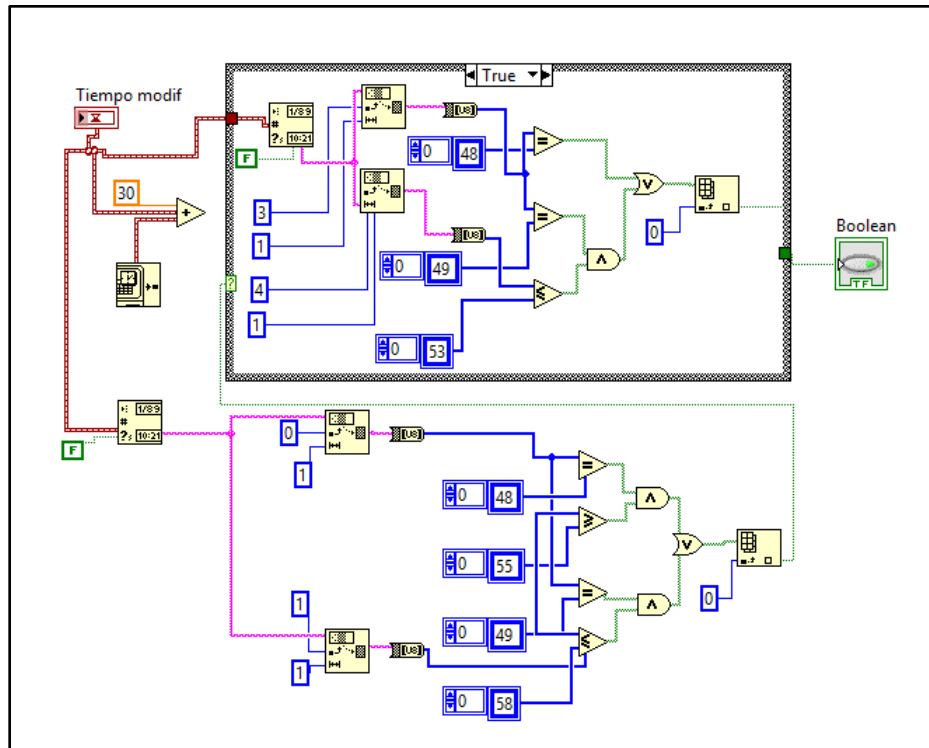


Figura 61: Programa de temporización de los riegos

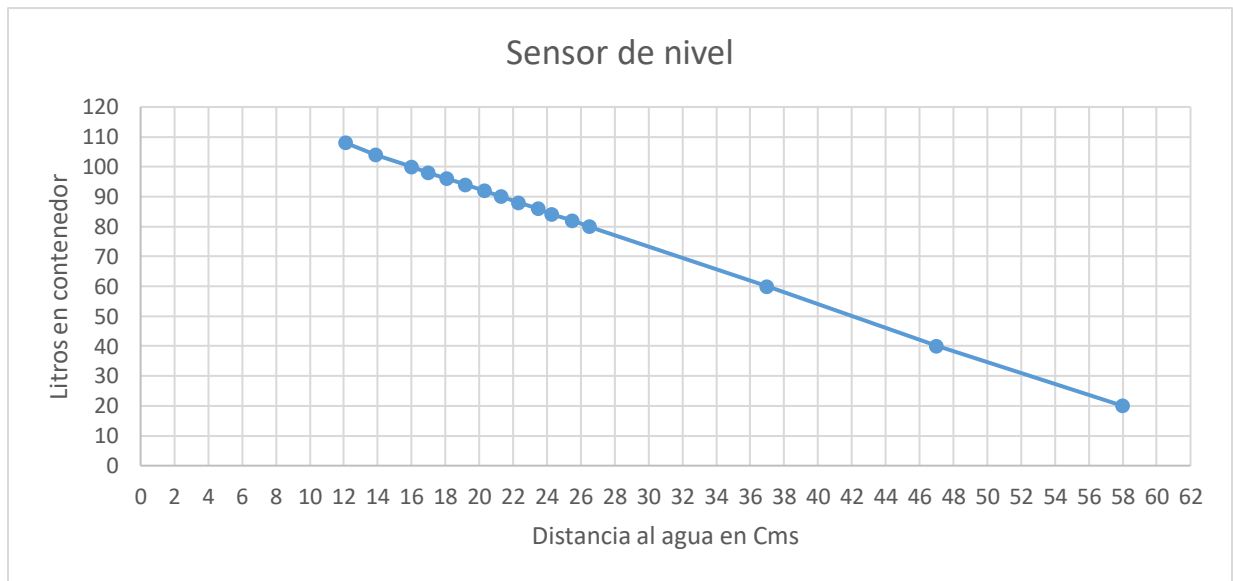
---

## 7.4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES:

Los sensores de CE y pH adquiridos ya cuentan con su acondicionamiento físico de señal para proporcionar voltaje desde 0 hasta 5 volts, voltajes que pueden ser leídos por la tarjeta de adquisición. De acuerdo con su ficha técnica, la salida en voltaje de ambos sensores debe mostrar un comportamiento lineal, sin embargo, es imperativo interpretar estos voltajes de acuerdo con la medida real que están sensando.

En el caso especial del sensor de nivel basa su funcionamiento en serie de pulsos y no en voltajes, sin embargo, la plataforma de programación cuenta con una función específica que permite leer su valor por lo que solo fue necesario tomar las distancias medidas por el sensor desde su ubicación hasta la SN, con volúmenes de SN conocidos, y caracterizar por medio de una función, la lectura en litros, la ecuación se muestra a continuación y la recta que la define se muestra en la Figura 62.

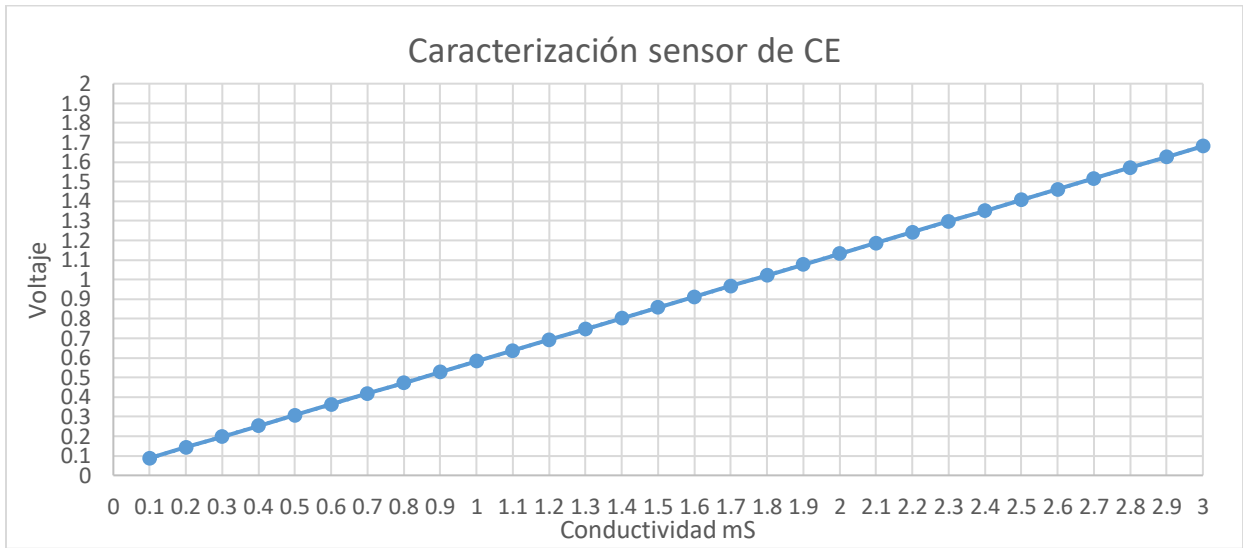
$$y = -1.94x + 131.52$$



**Figura 62: Relación entre la distancia medida al SN y los litros.**

Por lo tanto, para el caso del sensor de CE se usaron dos muestras representativas de CE conocida en el rango de operación de los sensores, una de 1.5mS y otra de 2mS. Con la información de voltaje obtenida para estos dos puntos, y sabiendo que el comportamiento esperado era lineal, se definió la recta que pasa por ambos puntos y se obtuvo la ecuación que la definía que se muestra en la Figura 63.

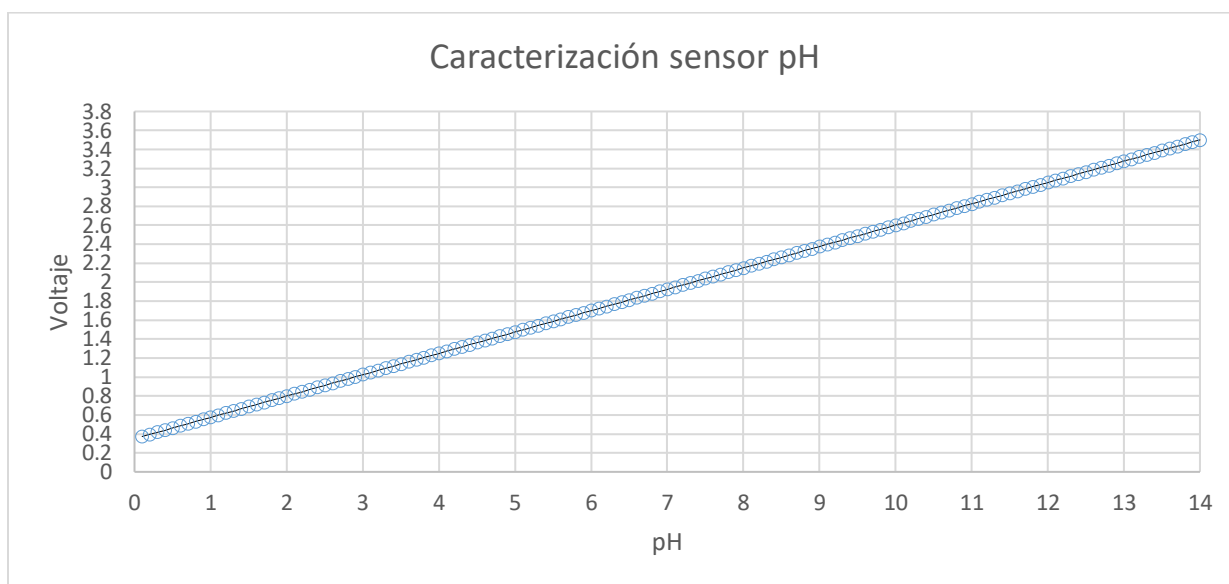
$$y = 1.26x + 0.60$$



**Figura 63: Relación entre CE de la SN y el voltaje**

Para el caso del sensor de pH se hizo el mismo procedimiento que se usó en el sensor de CE usando dos muestras, una de 5.5 y otra de 6.5, buscando que los valores estuvieran en el rango de operación del sensor, y con base en los resultados arrojados se obtuvo la recta que definía el comportamiento del voltaje respecto a la medida y su respectiva ecuación como se muestra en la Figura 64.

$$y = 4.44x - 1.55$$



**Figura 64: Relación entre pH de la SN y el voltaje**

#### 7.4.1 PROGRAMACIÓN:

Como se muestra en la Figura 65, los sensores son leídos por medio de las entradas analógicas de nuestra tarjeta de adquisición con el uso de la función “Read” del menú analógico de Linx, se hace una lectura de 3 canales, uno para conductividad, otro para pH y el último para la temperatura. Esta función obtiene solo los voltajes entregados por los sensores, por lo que es necesario interpretarlos en la escala a la que pertenecen, es decir convertir los voltajes a milisiemens, centígrados etc. Para esto se toma cada canal por separado y se hacen uso de funciones algebraicas de Matlab para describirla y tener a la salida de esta etapa un valor interpretable.

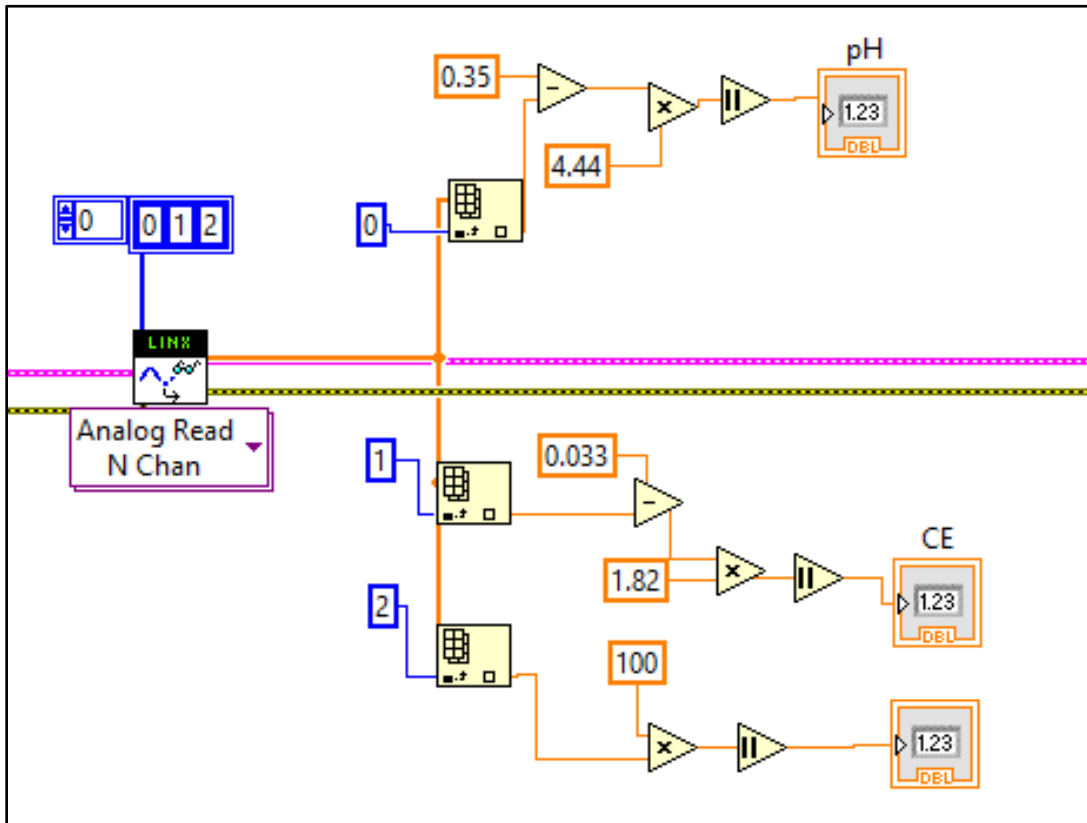
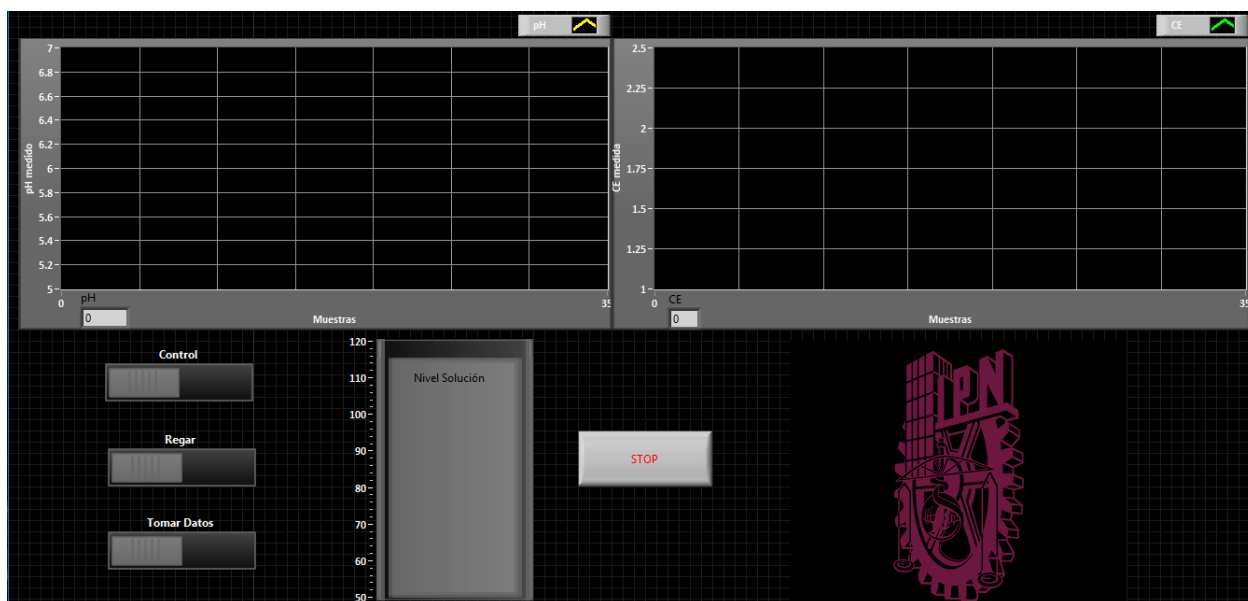


Figura 65: Adaptación de los sensores a las escalas requeridas

## 7.5 MONITOREO Y REGISTRO DE VARIABLES:

Para ver la evolución del sistema a lo largo del ciclo del cultivo, se propuso implementar gráficas que relacionaran el número de muestras en el tiempo con sus valores medidos, para de esta manera poder ver el comportamiento de las variables ante la aplicación del control. Además, para poder llevar un registro diario del comportamiento del sistema a lo largo del desarrollo del cultivo, se propuso guardar los datos en un archivo de Excel, de esta manera se podría analizar e interpretar datos para trabajos futuros.

El instrumento virtual creado se muestra en la Figura 66, se pueden apreciar las tres graficas correspondientes a cada una de las variables y los valores numéricos de cada una desplegados en el centro.



**Figura 66: Panel frontal del sistema de monitoreo**

### 7.5.1 PROGRAMACIÓN:

Para mostrar en el tiempo el desarrollo de una variable y para llevar el registro a una base de datos, LabView cuenta con las herramientas ya desarrolladas en forma de funciones, por lo que sólo fue necesario hacer uso de estas. Se incluyó la herramienta “Waveform Chart” para realizar las gráficas de las variables, y la función “Write to measurement file” que permite relacionar las variables adquiridas en cada corrida del programa con un documento de Excel, en el cual se almacena la fecha la hora y los valores que presentan en ese momento las variables en cuestión, por eso se hace uso de una variable local que permita leer desde adentro de la estructura una variable que se está sensando en otra parte del programa. Este código sólo se ejecuta cuando exista un verdadero a la

entrada de la estructura case, se definió activar este código pasados 30 minutos después de cada riego para así poder ver cambios significativos, la programación se muestra en la Figura 67.

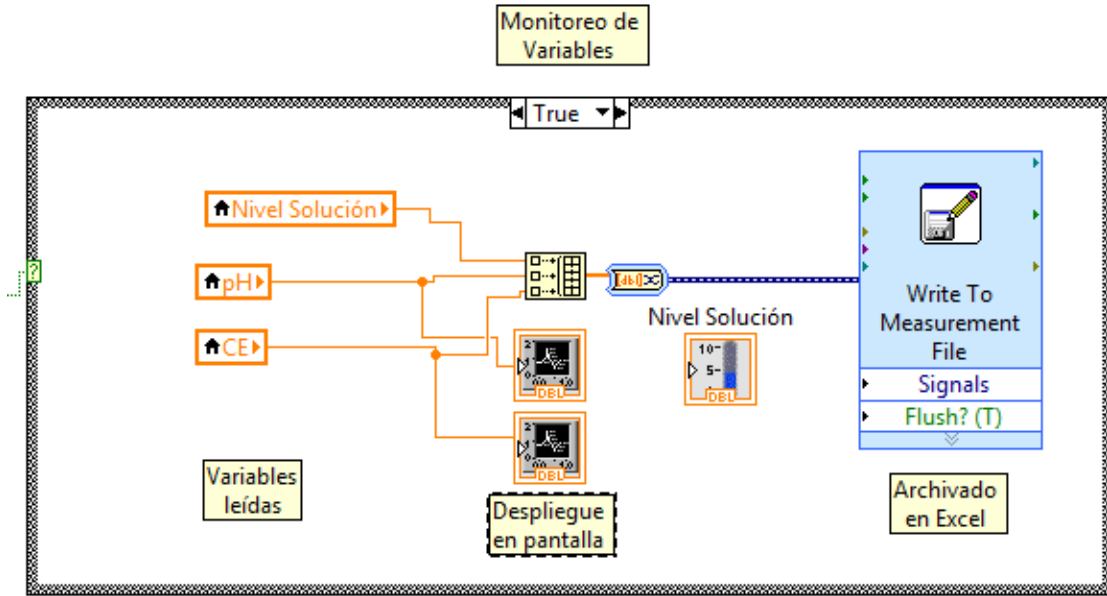


Figura 67: Código del despliegue de datos en el instrumento virtual.

## 7.6 CONTROL DIFUSO:

En la sección 7.2.4 se abordó la programación del sistema difuso, este último código tiene como propósito únicamente la creación del mismo, la utilización del sistema difuso como controlador se muestra a continuación.

### 7.6.1 PROGRAMACIÓN:

Se busca que la regulación de las condiciones de la solución nutritiva sea en un solo momento en el día, por lo que es necesario condicionar a que ocurra solo si se cumple una condición, al igual que se hizo con los riegos, es por eso que se hace uso de una estructura case para que solo cuando sean las 20:00 pm, por medio de un SubVi se active el control difuso. Se tiene el inconveniente de que el programa corre continuamente, y la condición se cumple durante un minuto entero por lo

que se fuerza una sola ejecución del código del controlador mediante una estructura for de un solo ciclo. Dentro de este ciclo for se encuentra nuestro controlador, para poder implementarlo se hizo uso de la función “Fuzzy Controller” la cual pide como parámetros las variables medidas al momento por el programa, y el sistema difuso creado en la sección 7.2.4. Como la salida del controlador es el tiempo que las bombas se encenderán, es necesario hacer uso de una función que active una señal digital que dure este tiempo, para este fin se hizo uso de la función “Elapsed Time” que es un temporizador al que se le pasa como parámetro la salida del controlador difuso y éste pone en alto su salida el tiempo que le indique la salida del controlador, al final esta señal booleana es enviada a la función “Digital Write” para que la tarjeta de adquisición se encargue de enviar la señal a la etapa de potencia y las bombas sean activadas. La sección de código correspondiente al control difuso se muestra en la Figura 68.

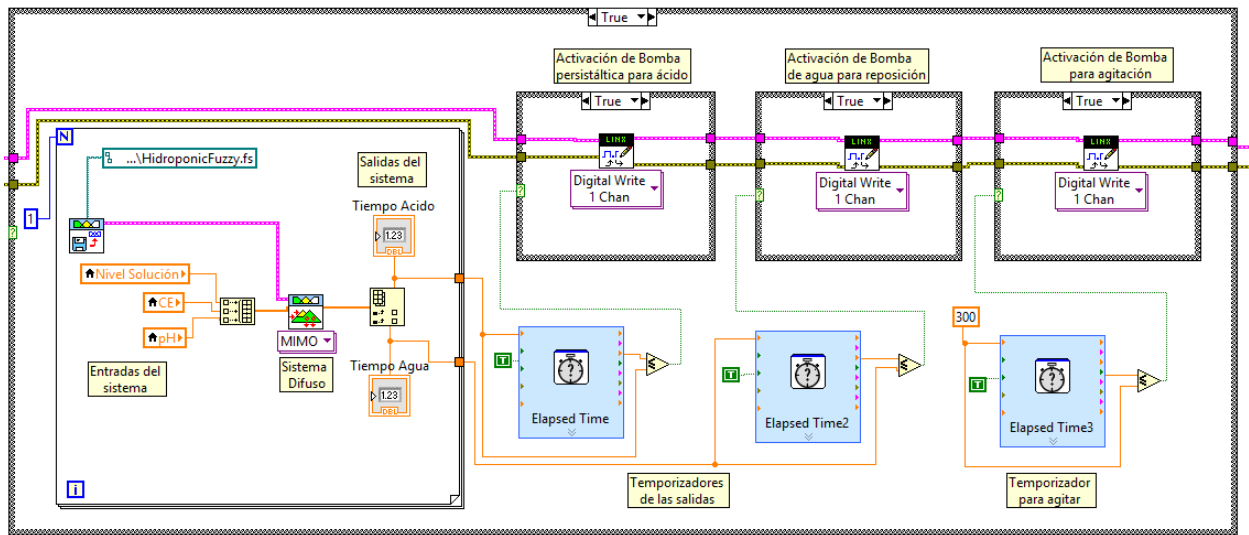


Figura 68: Vista general de la implementación del control difuso dentro del programa



---

### **7.7 COMUNICACIÓN A DISTANCIA:**

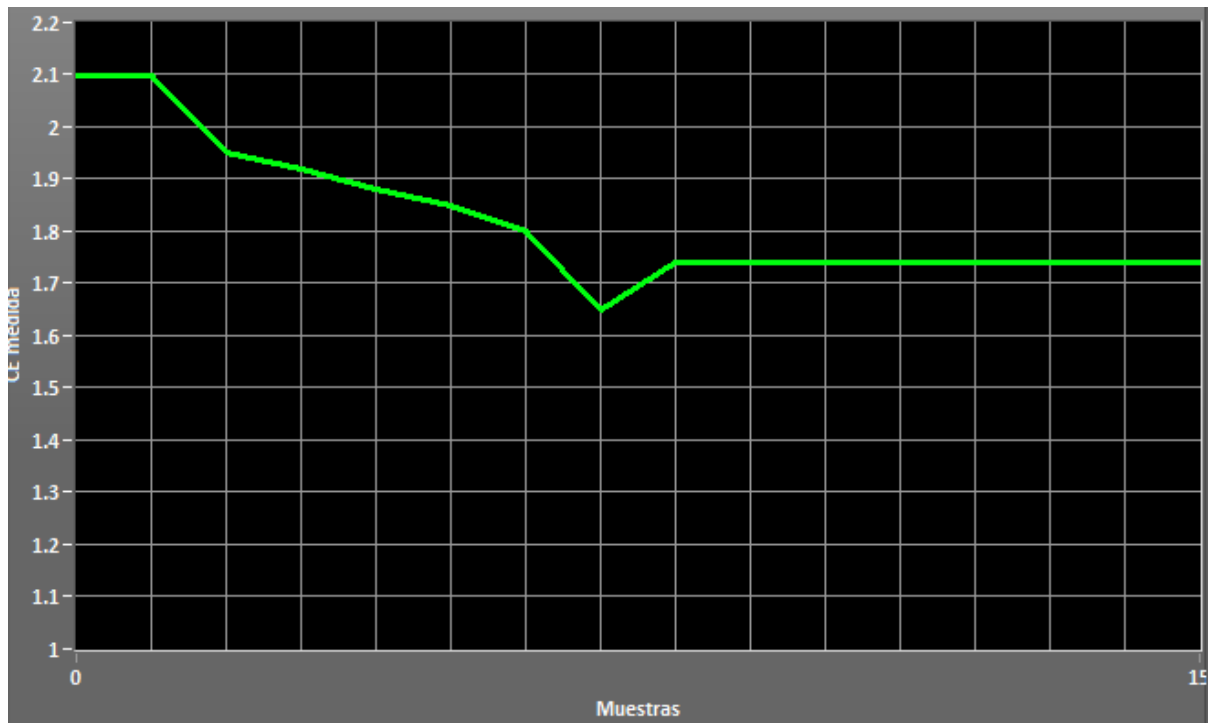
El sistema se pensó inicialmente para tener una distancia de no más de 10 metros entre el sistema de control y el sistema NFT ya que sería de uso doméstico y estaría colocado dentro las instalaciones de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, por lo que se estableció utilizar un cable USB cuyo alcance garantizara la comunicación serial vía USB a 10 metros. Al colocarse después el prototipo en el invernadero dentro de la Unidad Académica de Agronomía de la UAZ y al ver que éste alcanzaba temperatura de hasta 40°C y una irradiación solar intensa a lo largo del día, se decidió probar con tecnología inalámbrica Xbee por medio de comunicación serial para monitorear desde la comodidad de los laboratorios, mostrando buenos resultados en las pruebas individuales de captura de variables, sin embargo, al momento de integrar el programa completo, la comunicación se hizo inviable, por lo que se decidió para fines prácticos retomar el cableado USB y establecerlo como la comunicación final implementada.

---

## 8. PRUEBAS:

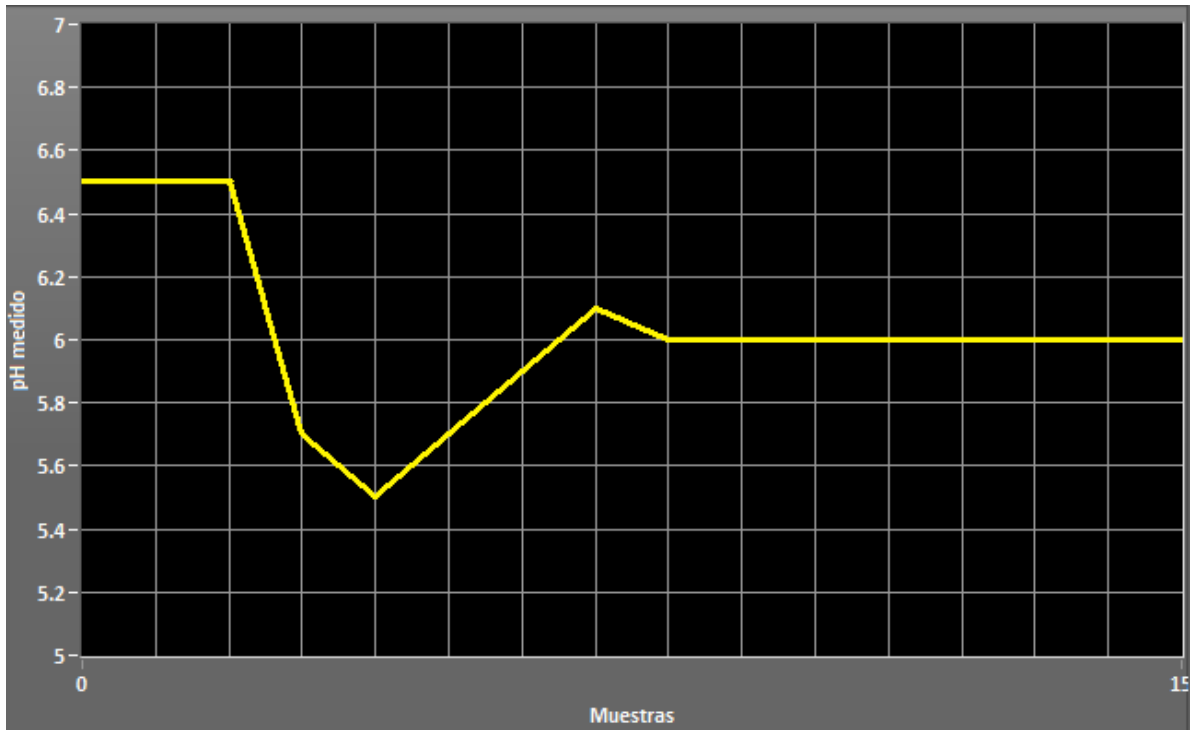
Una vez implantado el sistema se procedió a verificar su correcto funcionamiento. Se sabe que el cultivo a lo largo de su ciclo puede generar diferentes condiciones, las cuales fueron previstas dentro de las 125 reglas implantadas en el sistema difuso, un caso particular de interés en el control de las condiciones de la SN, es cuando llega a límites extremos permitidos, es decir cuando su pH alcanza un nivel igual o superior a 6.5, cuando la conductividad se encuentra arriba de los 2mS y cuando la planta logró su consumo máximo diario de agua, es decir, el nivel del tanque de la SN ha llegado a los 80 litros. Entonces se prepararon 80 litros de SN bajo las condiciones anteriormente mencionadas y se procedió a dejar actuar al controlador. El programa no está diseñado para observar los cambios de las condiciones del agua en tiempo continuo durante la realización del control, ya que solo monitorea las condiciones cada 15 minutos, por lo que se realizó una modificación para muestrear el proceso cada minuto durante la activación del controlador.

Para el caso de la CE observado en la Figura 69, puede verse un descenso gradual a medida que el sistema introduce agua dentro del tanque de la SN, las pequeñas variaciones pueden deberse a los instantes en que el electrodo del sensor se encontraba midiendo una porción de SN no homogénea, aunque al final la bomba que realizaba la agitación terminó por generar una lectura estable. Puede verse que la CE no alcanzó el valor ideal de 1.6mS debido a que la cantidad de agua permisible por el tanque de SN no puede ser superior a 110 litros, por lo que las reglas de control limitan el volumen, dejando la CE en el nivel mínimo alcanzable bajo esta restricción que fue de 1.72mS.



**Figura 69: Comportamiento de la CE ante el controlador**

En el caso del pH que se ilustra en la Figura 70, se pudo corroborar que el controlador estabilizó correctamente el sistema llevándolo a un pH de 6, a diferencia de la CE el pH mostró un comportamiento oscilatorio, debido a que en los instantes de tiempo medidos, la concentración de ácido era mayor en ciertos espacios del agua hasta que la bomba de agitación logró su homogenización y la media se estabilizó.



**Figura 70: Comportamiento del pH ante el controlador.**

---

## 9. CONCLUSIONES:

La estructura propuesta demostró ser suficientemente resistente para soportar el peso de los canales y las plantas, al menos hasta el punto en el que se pausó su desarrollo. Así como la configuración zigzag fabricada, demostró dotar de buena oxigenación al sistema, al no aparecer brotes de mico organismos en la SN.

Se comprobó que las bombas de agua de corriente directa son una excelente alternativa para proyectos hidropónicos NFT pequeños, ya que manejan caudales ideales, y alturas de operación considerables, permitiendo configuraciones verticales que ahorran espacio.

La elección de las variables lingüísticas, sus funciones de membresía y sus rangos de operación, establecidas en el sistema difuso, una vez aplicado el control, demostraron ser capaces de llevar el sistema a los valores iniciales definidos, tanto para el pH como para la CE.

El sistema de monitoreo resultó ser intuitivo al poder interpretar los resultados arrojados por las gráficas en instantes de tiempo definidos, así como para observar los valores puntuales medidos por los sensores en tiempo real para detectar cualquier anomalía.

## 10. TRABAJOS FUTUROS:

Las reglas de control del sistema difuso son un libro que queda abierto para la realización de una cantidad significativa de pruebas y lotes de cultivo extras, para que, de esta manera, los resultados que se obtengan puedan ser más representativos y confiables.

Queda para trabajos futuros agregar más variables de control al sistema difuso, tales como la humedad, la temperatura, intensidad lumínica presente, e incluso oxígeno disuelto para lograr resultados más precisos y confiables sobre el control de su irrigación. Así mismo, podrían utilizarse sensores especiales que detecten la presencia de componentes específicos en la SN, tales como los nitratos para poder actuar individualmente sobre ellos y lograr mejores resultados. Para todo lo

---

anterior, sería deseable contar con herramientas de más capacidad de procesamiento que logren sobrellevar los cálculos matemáticos que requiere un controlador difuso complejo.

Es ampliamente deseable contar también con un control sobre las condiciones ambientales en las que se encuentra el sistema NFT, para evitar que se lleguen a extremos indeseables. La hidroponía necesita de cuidados especiales en términos de luminosidad y de temperatura, por lo que, de no contar con los espacios adecuados para su realización, se puede propiciar un mal desarrollo o la muerte de las mismas.

---

## 11. REFERENCIAS:

- [1] S. Wortman, *Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system*, Scientia Horticulturae, vol. 194, pp. 24-42, Mar. 2016.
- [2] D. Domingues, H. Takahashi, C. Camara, S. Nixdorf, " Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production " Computers and Electronics in Agriculture, vol. 84, pp. 53-61, Feb. 2012.
- [3] J. Santos, *Sistema de control electrónico de pH y esterilización, de agua*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, 2009.
- [4] R. Cano, A. Yañez, *Control automático de pH basado en lógica difusa en la etapa de mezclado de un proceso de elaboración de detergente líquido*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, 2012.
- [5] Prosystem Aqua, *Aplicación de controladores de pH y eC en cultivos hidropónicos*, [Online]. Disponible en: <http://www.prosystemaqua.com/aplicacion-ph-ec-en-hidroponia.php>
- [6] Hydro environment, *Técnicas Hidropónicas* [Online]. Disponible en: [http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=30](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=30)
- [7] J. Benton, *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. Florida, CRC Press, 2005.
- [8] Raymond Chang, *Química*. USA, Mcgraw-Hill, 2002.
- [9] Grainger, *Tipos y Usos de Electrodo pH de la Actualidad*. [Online]. Disponible en: <https://espanol.grainger.com/content/supplylink-todays-ph-electrodes-types-uses>
- [10] G. Brajovic (2012). *La importancia del pH en hidroponía*. [Online]. Disponible en: <http://www.hidroponic.cl/la-importancia-del-ph-en-hidroponia/>
- [11] J. González, *Medida del Ph*, [Online], España: Universidad del País Vasco, disponible en: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/medida.htm>

- 
- [12] InfoAgro, *Conductividad eléctrica*. [Online]. Disponible en: [http://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/doc\\_conductividad\\_electrica.asp?k=53](http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53)
- [13] Ohaus, *Conductivity electrode*. [Online]. Disponible en: <http://us.ohaus.com/en-us/products/instruments-equipment/water-analysis/starter-electrodes/4-ring-conductivity-electrode-stcon3>
- [14] M. Standring, *The Conductivity of Aqueous solutions*, disponible en: <https://chemistry11mrstandring.wikispaces.com/The+Conductivity+of+Aqueous+solutions>
- [15] A. Bolaños, M. Pérez, E. Garza, *Tutorial de analisis de agua*, México: Universidad Autónoma de Tamaulipas, disponible en: <http://arturobola.tripod.com/conducti.htm>
- [16] Ohaus, *Conductivity electrode*. [Online]. Disponible en: <http://us.ohaus.com/en-us/products/instruments-equipment/water-analysis/starter-electrodes/4-ring-conductivity-electrode-stcon3>
- [17] K. Ogata, *Dinámica de Sistemas*, USA: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1987, cap 8, pp.494-528.
- [18] C. Valdivia, *Sistemas de control continuos y discretos*, disponible en: [https://books.google.com.mx/books/about/SISTEMAS\\_DE\\_CONTROL\\_CONTINUOS\\_Y\\_DISCRETO.html?id=kPb7zb-RwJYC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.mx/books/about/SISTEMAS_DE_CONTROL_CONTINUOS_Y_DISCRETO.html?id=kPb7zb-RwJYC&redir_esc=y)
- [19] *Sistemas Digitales*, disponible en: [http://html.rincondelvago.com/sistemas-digitales\\_1.html](http://html.rincondelvago.com/sistemas-digitales_1.html)
- [20] O. Ramírez, *Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot udlap*, Tesis licenciatura, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, 2008.
- [21] F. Rodríguez, M. López, *Control adaptivo y robusto*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, 1996.



---

[22] National Instruments, *Data Acquisition*. [Online]. *Disponible en:* <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

[23] Electrin, *Estructura básica de un PLC* [Online]. *Disponible en:* <https://electrinblog.wordpress.com/2016/04/24/post-2/>

[24] Mikroelektronika, *Características básicas del pic16f887* [Online]. *Disponible en:* <http://learn.mikroe.com/ebooks/microcontroladorespic/chapter/caracteristicas-basicas-del-pic16f887/>

[25] Rex Niedermayer, *Aquarium water pumps part 1* [Online]. *Disponible en:* <http://reefkeeping.com/issues/2002-04/rn/index.php>

[26] Everychina *pumps1* [Online]. *Disponible en:* <http://www.everychina.com/m-mini-12v-dc-solar-water-pump>

[27] All pumps, *Abaque peristaltic hose pupms* [Online]. *Disponible en:* <https://www.allpumps.com.au/brands/abaque>

[28] Rodrigo Maureira, *Puente H* [Online]. *Disponible en:* <http://smartdreams.cl/puente-h/>

[29] Copadata, *Interfaz hombre-máquina (HMI)*. [Online]. *Disponible en:* <https://www.copadata.com/es-mx/soluciones-hmi-scada/interfaz-hombre-maquina-hmi/>

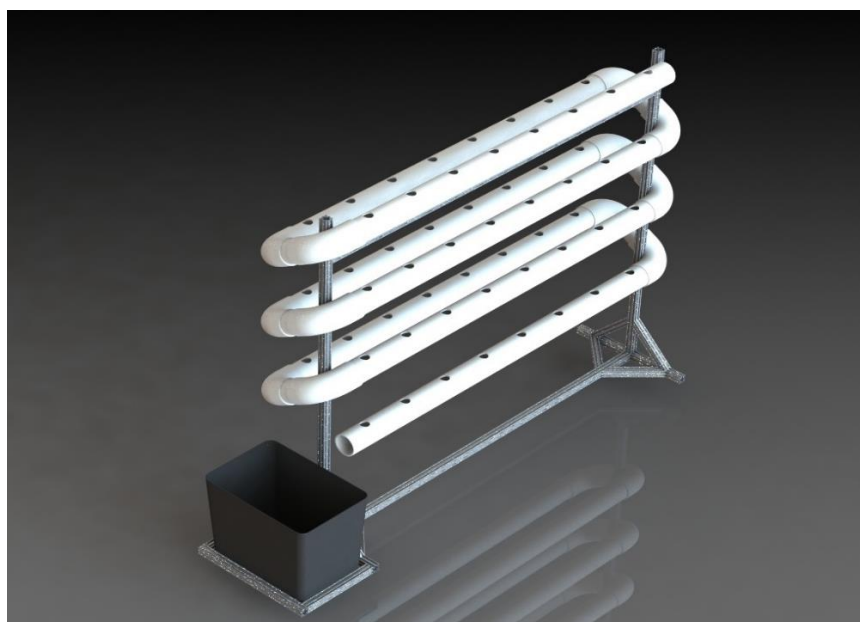
[30] UVM, *Valoraciones ácido base*[Online]. *Disponible en:* <http://apuntescientificos.org/acido-base.html>

[31] Cosechando natural, *Cultivo mediante NFT* [Online]. *Disponible en:* [https://www.cosechandonatural.com.mx/cultivo\\_mediante\\_nft\\_articulo38.html](https://www.cosechandonatural.com.mx/cultivo_mediante_nft_articulo38.html)

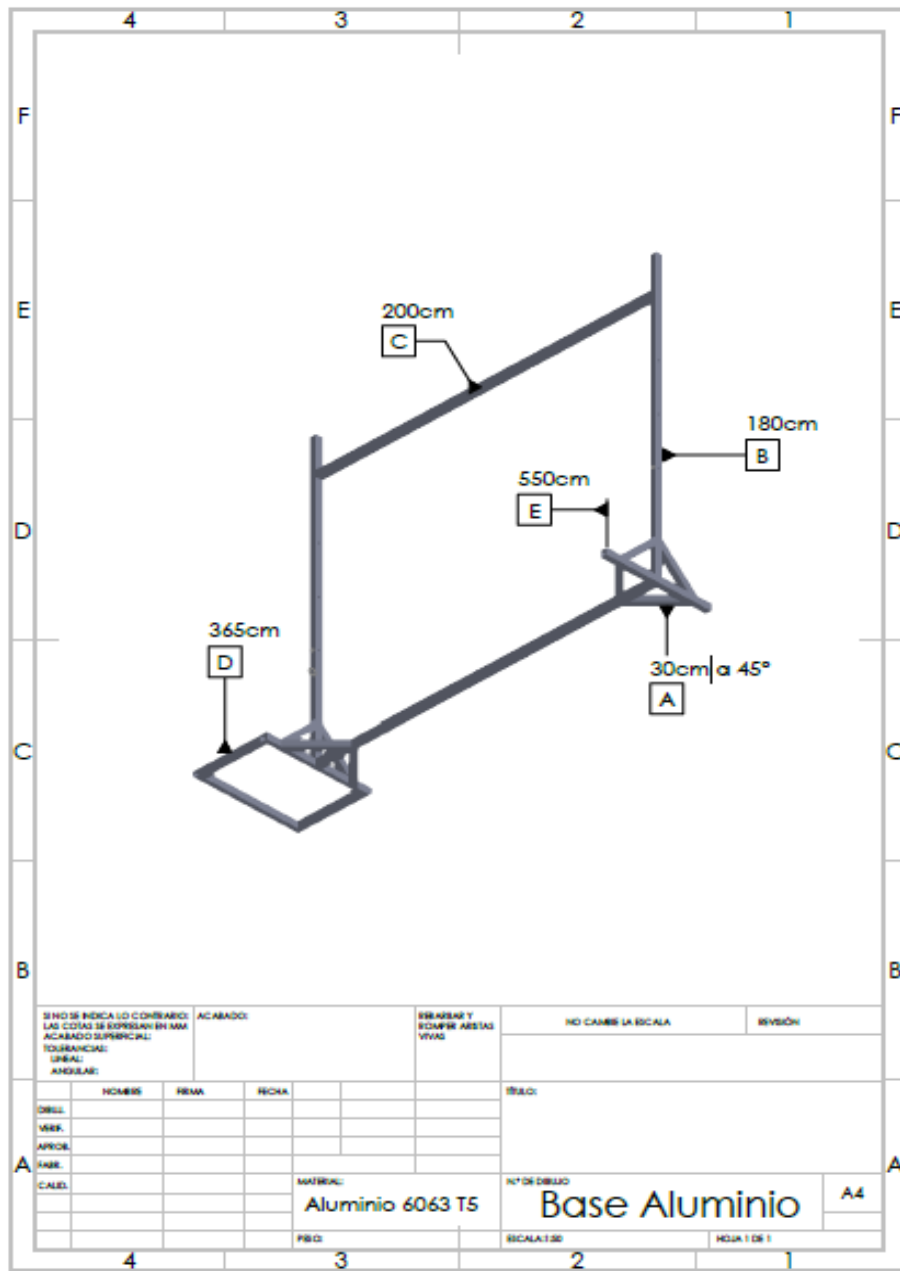
---

**ANEXOS:**

**ANEXO A: BOCETO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA NFT**



**ANEXO B: DIMENSIONES DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA:**



# ANEXO C: DIAGRAMA ELÉCTRICO

