



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Automatización de las variables nutrient film technique en el cultivo hidropónico  
de lechugas**

Espinoza Beltrán, Paúl Stalin

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica

Centro de Posgrado

Maestría en Electrónica y Automatización Mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y  
Automatización Mención Redes Industriales

Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio, Mgs.

17 de abril de 2022

Latacunga



Proyecto Titulación\_Paul Espinoza3.pdf

Scanned on: 20:55 March 31, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	128
Words with Minor Changes	1
Paraphrased Words	29
Omitted Words	233

Firma:

MARCO  
ANTONIO  
PILATASIG  
PANCHI

Firmado  
digitalmente por  
MARCO ANTONIO  
PILATASIG  
PANCHI

Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio, Mgs.

**DIRECTOR**



## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y

### TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

#### CENTRO DE POSGRADOS

#### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, “**AUTOMATIZACIÓN DE LAS VARIABLES NUTRIENT FILM TECHNIQUE EN EL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS**” fue realizado por el señor **ESPINOZA BELTRÁN, PAÚL STALIN** el mismo que ha sido revisado y analizado en su totalidad, por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 17 de abril del 2022

MARCO  
ANTONIO  
PILATASIG  
PANCHI

Firmado  
digitalmente por  
MARCO ANTONIO  
PILATASIG  
PANCHI

.....  
**Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio, Mgs.**  
**C.C.: 0502375876**  
**DIRECTOR**



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y**

**TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS**

**Responsabilidad de autoría**

Yo **ESPINOZA BELTRÁN, PAÚL STALIN**, con cédula de ciudadanía n° **1803833373**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“AUTOMATIZACIÓN DE LAS VARIABLES NUTRIENT FILM TECHNIQUE EN EL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS”** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 17 de abril del 2022

.....  
**Espinoza Beltrán, Paúl Stalin**

**C.C.: 1803833373**



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS**

**Autorización de publicación**

Yo **ESPINOZA BELTRÁN, PAÚL STALIN**, con cédula de ciudadanía n° **1803833373**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“AUTOMATIZACIÓN DE LAS VARIABLES NUTRIENT FILM TECHNIQUE EN EL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 17 de abril del 2022

.....  
**Espinoza Beltrán, Paúl Stalin**

**C.C.: 1803833373**

### **Dedicatoria**

En primer lugar, a Dios por haberme cuidado y protegido día con día y mantenerme con salud y vida, en este tiempo de grandes riesgos para toda la humanidad. A la Universidad de las Fuerzas Armadas, pues me ha dado la oportunidad de ser parte de este programa de formación, el mismo que servirá para enriquecer mi accionar en el campo laboral y personal. A mi tutor del proyecto de titulación, Ing. Marco Pilatasig. Mgs., que me ha orientado de una manera acertada y por ello, hoy he llegado a alcanzar este objetivo en mi formación. A mis compañeros de clase, con quienes hemos compartido extensas jornadas de trabajo y en los que, me he apoyado para concluir con éxito este post grado.

*Paul S. Espinoza B.*

## **Agradecimiento**

En primer lugar, doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida. Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres, en todo el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. A mis hermanos; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. Por último, a mis compañeros de tesis porque en esta armonía grupal lo hemos logrado y a mi tutor quién me ayudó en todo momento.

*Paul S. Espinoza B.*

## Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenidos.....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenidos .....	8
Índice de Figuras .....	12
Índice de Tablas .....	15
Resumen .....	16
Abstract.....	17
Capítulo i.....	18
Contenidos generales .....	18
Antecedentes .....	18
Problema.....	19
Objetivos.....	20



<b>Objetivo General</b> .....	20
<b>Objetivos Específicos</b> .....	20
Justificación, importancia y alcance del proyecto .....	21
Hipótesis de investigación.....	22
<b>Categorización de las variables de investigación</b> .....	21
<b>Capítulo ii</b> .....	25
<b>Fundamentación Teórica</b> .....	25
Marco legal.....	25
Marco Conceptual .....	26
<b>Sistemas de control</b> .....	26
<b>Sistemas de primer orden</b> .....	31
<b>Acciones básicas de control</b> .....	32
<b>Reguladores tipo P e I</b> .....	32
<b>Regulador tipo PI</b> .....	34
<b>Procesos industriales</b> .....	35
Proceso autorregulado.....	36
Proceso integrante .....	37
<b>Controladores PID</b> .....	39
<b>Métodos de sintonía de controladores PID</b> .....	40
<b>Autómatas controladores logoV8 de siemens</b> .....	44
Configuración compacta .....	45
<b>La Hidroponía</b> .....	46
Sistemas hidropónicos:.....	47
Nutrient Film Technique (NFT).....	48

	10
Importancia del pH y de la CE en el desarrollo de la planta .....	50
Ventajas de las plantas hidropónicas: .....	54
<i>Lechuga</i> .....	54
<b>Capítulo iii</b> .....	<b>57</b>
<b>Metodología de la investigación</b> .....	<b>57</b>
Diseño del diagrama P&ID de la automatización de las variables .....	58
Controlador de conductividad eléctrica (CE).....	60
Controlador de potencial de hidrogeniones (pH) .....	62
Solución nutritiva(18-18-18-2MgO).....	64
Obtención del modelo matemático .....	66
Cargar los datos al Workspace.....	68
Grafica de la planta plot(t,u,t,y).....	69
Sintonía del controlador PID .....	71
Simulación del controlador PID.....	72
Circuito eléctrico.....	75
Sistema de control PI .....	79
Control de nivel.....	81
Mando manual y automático .....	82
Programa del cultivo hidropónico.....	83
<b>Capítulo iv</b> .....	<b>85</b>
<b>Resultados</b> .....	<b>85</b>
Sistema de control PI.....	85
Sistema de control PI con perturbación.....	88

Comprobación de la hipótesis .....	90
Capítulo v.....	92
Conclusiones y Recomendaciones .....	92
Conclusiones .....	92
Recomendaciones .....	93
Bibliografía .....	94
Anexos .....	97

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Elementos de un sistema de control</i> .....	28
<b>Figura 2</b> <i>Control en lazo abierto</i> .....	29
<b>Figura 3</b> <i>Control de lazo cerrado</i> .....	30
<b>Figura 4</b> <i>Respuesta a impulso unitario del sistema</i> .....	31
<b>Figura 5</b> <i>Regulador tipo P</i> .....	33
<b>Figura 6</b> <i>Regulador tipo PI</i> .....	34
<b>Figura 7</b> <i>Respuesta de un Proceso Autorregulado</i> .....	36
<b>Figura 8</b> <i>Respuesta de un Proceso Integrante</i> .....	38
<b>Figura 9</b> <i>Estructura de un lazo de control simple</i> .....	41
<b>Figura 10</b> <i>Autómata compacto</i> .....	45
<b>Figura 11</b> <i>Cultivo hidropónico (NFT)</i> .....	49
<b>Figura 12</b> <i>Trasmisor de conductividad</i> .....	51
<b>Figura 13</b> <i>Trasmisor de pH</i> .....	53
<b>Figura 14</b> <i>Lechuga cressa</i> .....	56
<b>Figura 15</b> <i>Esquema del proyecto</i> .....	57
<b>Figura 16</b> <i>Diagrama P&amp;ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel</i> . 59	
<b>Figura 17</b> <i>Trasmisor EC-510</i> .....	60
<b>Figura 18</b> <i>Trasmisor Meter (PH)</i> .....	62

<b>Figura 19</b> Datos en el Workspace .....	69
<b>Figura 20</b> Grafica de la planta $\text{plot}(t,u,t,y)$ .....	70
<b>Figura 21</b> Representacion de la planta en simulink .....	71
<b>Figura 22</b> Simulación del controlador PID con varios métodos de sintonía .....	73
<b>Figura 23</b> Resultados de los métodos de sintonía .....	74
<b>Figura 24</b> Caja de control.....	75
<b>Figura 25</b> Sensores de CE y pH.....	75
<b>Figura 26</b> Circuito eléctrico .....	77
<b>Figura 27</b> Bloque del Regulador PI .....	79
<b>Figura 28</b> Calibrar los parámetros del controlador PI .....	80
<b>Figura 29</b> Sistema de control PI .....	80
<b>Figura 30</b> Graficas del proceso.....	81
<b>Figura 31</b> Control de nivel.....	82
<b>Figura 32</b> Mando Manual - Automático .....	83
<b>Figura 33</b> Programa del cultivo hidropónico.....	84
<b>Figura 34</b> Sistema de control PI .....	85
<b>Figura 35</b> Simulación del Controlador PI, para la CE .....	86
<b>Figura 36</b> Simulación del Controlador PI para el pH.....	86
<b>Figura 37</b> Simulación del controlador PI con variación se señal .....	87

<b>Figura 38</b> <i>Sistema de control con perturbación</i> .....	88
<b>Figura 39</b> <i>Graficas sistema de control con perturbación</i> .....	89
<b>Figura 40</b> <i>Plantación de lechugas</i> .....	90
<b>Figura 41</b> <i>Resultados</i> .....	91

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Operacionalización de las Variables</i> .....	23
<b>Tabla 2</b> <i>Parámetros de sintonía del controlador</i> .....	43
<b>Tabla 3</b> <i>Métodos de sintonía para un controlador PID para procesos integrantes</i> . ....	43
<b>Tabla 4</b> <i>Medición del transmisor EC-510</i> .....	61
<b>Tabla 5</b> <i>Medición del transmisor Meter</i> .....	63
<b>Tabla 6</b> <i>Solución nutritiva 18-18-18 + 2MgO</i> .....	65
<b>Tabla 7</b> <i>Variación de la variable CE</i> .....	67
<b>Tabla 8</b> <i>Constantes de sintonía para el controlador del cultivo hidropónico</i> .....	72
<b>Tabla 9</b> <i>Conexión de los puertos del PLC logoV8</i> .....	76
<b>Tabla 10</b> <i>Parámetros en la curva de salida</i> .....	89

## Resumen

El proyecto es la implantación y automatización de un sistema de cultivo Hidropónico con la tecnología nutrient film technique (NFT). Con la investigación realizada, familias de recursos promedio del centro del país se enmarque en el cultivo de hortalizas mediante cultivo hidropónico. En los últimos tiempos en los sectores de la región central del país donde se ha cultivado, se ha degradado el suelo, por tal motivo se debe abonar con productos orgánicos y químicos, durante la cosecha se debe rociar con fungicidas para eliminar las enfermedades y plagas del cultivo, se tiene un sistema de regadío de agua para mantener húmedo el suelo. El sistema hidropónico consiste en un fluido de nutrientes por unas tuberías donde albergan a las plantas, la cantidad de nutrientes inyectadas al cultivo permiten que las variables como el pH se encuentre entre 0.55 y 0.65 y la conductividad eléctrica entre 1.2 y 1.8, para esto se debe realizar un sistema de control en lazo cerrado que utiliza un controlador lógico programable (PLC), un sistema de electroválvulas, sensores y bomba de agua. En el presente proyecto se considera como hortaliza bajo análisis a la lechuga, para la cual en el transcurso del desarrollo del proyecto no se rociará con ningún tipo de fungicidas dando como resultado una lechuga saludable y que mejora la inmunidad.

Palabras Clave:

- **SISTEMAS HIDROPÓNICOS**
- **CONTROL DE VARIABLE DE CRECIMIENTO DE HORTALIZAS**
- **NUTRIENT FILM TECHNIQUE**
- **CULTIVO DE LECHUGA**



## **Abstract**

The project is the implementation and automation of a Hydroponic growing system with the nutrient film technique (NFT) technology. With the research carried out, average resource families in the center of the country are framed in the cultivation of vegetables through hydroponic cultivation. In recent times, in the sectors of the central region of the country where it has been cultivated, the soil has degraded, for this reason it must be paid with organic and chemical products, during the harvest it must be sprayed with fungicides to eliminate diseases and pests. of the crop, there is a water irrigation system to keep the soil moist. The hydroponic system consists of a fluid of nutrients through pipes where the plants are housed, the amount of nutrients injected into the crop allows variables such as pH to be between 0.55 and 0.65 and electrical conductivity between 1.2 and 1.8, for this You must realize a closed-loop control system that uses a programmable logic controller (PLC), a system of solenoid valves, sensors, and a water pump. In the present project, lettuce is considered as a vegetable under analysis, for which during the development of the project it will not be sprayed with any type of fungicides, resulting in a healthy lettuce that improves immunity.

Keywords:

- **HYDROPONIC SYSTEMS**
- **VARIABLE GROWTH CONTROL OF VEGETABLES**
- **NUTRIENT FILM TECHNIQUE**
- **CULTIVATION OF LETTUCE**

## Capítulo i

### Contenidos generales

#### Antecedentes

La lechuga es considerada la hortaliza de hoja por excelencia, dada su alta calidad culinaria como ensalada fresca. Se cultiva en todo el mundo bajo diferentes sistemas de cultivo, al aire libre y bajo invernadero, en suelo y también en hidroponía como indica (Carrasco et al., 1996)

Según la Taxonomía vegetal, la lechuga pertenece a la familia de las compuestas y su nombre botánico es *Lactuca sativa* como indica (INFOAGRO, 2000).

Según la morfología, la lechuga es una hortaliza que se cultiva todo el año. Su sistema radical, que en general tiene 0.25 m de profundidad, presenta una raíz primaria pivotante, corta y con ramificaciones. La disposición de las hojas es variable; en algunas formas las hojas se mantienen desplegadas y abiertas, y en otras, en cierto momento del desarrollo, las hojas se expresan de tal manera que forman una cabeza o cogollo más o menos consistente y apretado. Cuando la lechuga entra en su fase reproductiva emite el tallo floral, las temperaturas óptimas para el crecimiento son de 18 a 23°C durante el día y de 7 a 15°C durante la noche como indica (Carrasco et al., 1996).

Las verduras son nutrientes que necesita el ser humano. La hidroponía basada en nutrient film technique (NFT), es el sistema se utiliza normalmente para producir hortalizas en pequeñas granjas que puede acelerar el tiempo de cosecha con productos de alta calidad. Uno de los parámetros más importantes en hidroponía es el suministro de cantidades adecuadas de nutrientes en función a la edad de la planta. En este

estudio, el sistema hidropónico basado en NFT ha sido diseñado por el sistema de control de lógica difusa. El valor del punto de ajuste de la conductividad eléctrica (ce) de la solución nutritiva se realiza por la necesidad de la planta según la investigación de (Siti Mashumah et al., 2018).

Se evaluó el sistema hidropónico de la técnica de película de nutrientes (NFT) para la producción de lechuga francesa (*Lactuca sativa* L.) y lechuga romana (*Lactuca sativa* L.) en las condiciones climáticas artificiales proporcionadas por invernadero en el ciclo otoño-invierno en Reynosa. El semillero se desarrolló en otoño y la producción en invierno. La producción de lechuga francesa obtenida fue de 0.55 kg/pieza (23.6 ton/ha/ciclo) y 0.40 kg/pieza (23.6 ton/ha/ciclo) para la densidad de plantación de 4.3 y 5.9 plantas/m<sup>2</sup>, respectivamente. La producción de lechuga romana obtenida fue de 0.55 kg/pieza (32.4 ton/ha/ciclo) con una densidad de plantación de 5.9 plantas/m<sup>2</sup>. El consumo de agua fue de 13.8 litros/planta correspondiendo un 93.0% de este consumo a la evapotranspiración y el resto a materia seca. El ciclo de cultivo fue de 27 días en el semillero y de 59 días del trasplante hasta el fin de la cosecha como dice (Jacques-Hernandez & Hernandez, 2005).

## **Problema**

En el análisis realizado en la parroquia El Quinche se encontró niveles de concentración de plomo que no sobrepasan lo recomendado en el cultivo de lechuga producida de forma convencional, debido a que al comparar los resultados obtenidos con las concentraciones máximas establecidas por un conjunto de normas internacionales de los alimentos (CODEX), para la lechuga convencional existe en promedio una concentración en plomo de 0,28 mg/Kg, y la concentración establecida es 0,3 mg/kg y al analizar la presencia de cadmio en lechuga, las concentraciones

encontradas fueron 0,05 mg/Kg en muestras convencionales, siendo valores muy inferiores al límite establecido por el CODEX (0,20 mg/Kg), según las investigaciones de(Pila, 2016).

En la región sierra central, a pesar de su producción significativa de hortalizas, no existen estudios previos en el medio que indiquen con certeza cuál es la concentración de plomo (Pb) en el tejido vegetal, lo cual es fundamental conocer ya que si bien, el cultivo y la producción de alimentos es una actividad cada vez más popular.

En el centro del país, las tierras para ser cultivadas se preparan, con fertilización de abonos orgánicos y químicos, y para el control de enfermedades y plagas se inyecta fungicidas a las plantas provocando una degradación del suelo. Se utiliza un sistema de regadío por aspersión constante de agua, el mismo que es adquirido y que perjudica la estabilidad económica de la familia.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Implementar un sistema de automatización de las variables nutrient film technique en el cultivo hidropónico de lechugas para minimizar los contaminantes que existentes en un cultivo tradicional.

### ***Objetivos Específicos***

- Recolectar datos de la cantidad de nutrientes necesarios para el desarrollo de la planta de lechuga.
- Investigar el potencial hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (ce) que deben tener en un cultivo hidropónico.

- Investigar los sistemas de control para las variables nutrient film technique en cultivo hidropónico.
- Implementar el sistema de control seleccionado
- Analizar la cantidad de plomo y cadmio en la lechuga producida en el sistema hidropónico.

### **Justificación, importancia y alcance del proyecto**

Una de las causales más importantes en la actualidad de problemas en los productos de consumo, es la contaminación del suelo donde crecen y se desarrollan las plantas de lechugas. El sistema hidropónico inteligente NFT, suministra las cantidades de nutrientes necesarias para que la hortaliza se desarrolle de una manera natural y orgánica, disminuyendo las porciones de plomo por cada planta, esto mejorará al sistema inmunológico de los consumidores, disminuyendo las enfermedades que están asociadas por consumir productos contaminados.

La implementación del cultivo hidropónico, se realiza para aprovechar el espacio físico, aumentar la producción, tener menos pérdidas por cada cosecha y no depende de las estaciones del año para el sembrío de las plantas, disminuir la cantidad de agua que se utiliza en un cultivo de lechugas de forma convencional.

El sistema de control de las variables del sistema NFT, permite interactuar con los nutrientes requeridos por la planta en cada fase de crecimiento, la circulación del agua se realiza de forma constantes para que las lechugas puedan alimentarse.

El alcance del proyecto es producir una cantidad limitada de plantas de lechugas en las mejores condiciones, lo que inducirá para una producción en mayor cantidad que permitirá llegar con lechugas orgánicas a más familias de país, libres de contaminantes

y con un grado de plomo permitido por la organización mundial de la salud que debe ser menor a 0,3 mg/kg.

### **Hipótesis de investigación**

La implementación del sistema de control en un cultivo hidropónico de lechugas permitirá minimizar los contaminantes que existentes en un cultivo tradicional.

### ***Categorización de las variables de investigación (variables independiente y dependiente).***

La hipótesis planteada se identifican dos variables:

- ***Variable Independiente:*** Sistema de control de las variables NFT.
- ***Variable Dependiente:*** Contaminantes en la producción de lechugas.

La operacionalización de las variables se muestra en la Tabla 1

**Tabla 1***Operacionalización de las Variables*

<b>VARIABLES</b>	<b>TIPO</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
Sistema de control de las variables NFT	Independiente	El sistema de control de las variables NFT permite realizar el monitoreo, supervisión y control de los nutrientes que son necesarios para el desarrollo de la planta de lechugas	Un sistema de control de las variables de NFT permite minimizar los contaminantes existentes en cultivos de lechugas tradicional, mediante el sistema de control proporcionará los nutrientes necesarios para cada etapa de desarrollo de la planta.	- Costo de operación - Tiempo de cosecha.	- Costo mínimo de operación del sistema hidropónico. - Sistema de control con respuestas más rápidas.

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENS IONES	INDICA DORES
Contaminantes en la producción de lechugas	Dependiente	Las enfermedades transmitidas por alimentos constituyen un problema de salud, diversos estudios demuestran la alta contaminación microbiológica de la lechuga en la cadena alimentaria	La producción de lechugas orgánicas libres de pesticidas mejora la inmunidad de los seres humanos, mejorando su calidad de vida.	Niveles de cadmio en las lechugas orgánicas  Niveles de plomo en las lechugas orgánicas	Cantidad es mínimas de cadmio en las lechugas.  Cantidad es mínimas de plomo en las lechugas



## Capítulo ii

### Fundamentación Teórica

#### Marco legal

- Norma ISA S5.1, S5.3. permiten el diseño diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).
- La Norma IEC LaNormalIEC-61131

La finalidad de esta Norma IEC-61131es:

- Definir e identificar las características principales es que se refieren a la selección y aplicación de los PLC´s y sus periféricos.
  - Especificar los requisitos mínimos para las características funcionales, las condiciones de servicio, los aspectos constructivos, la seguridad general y los ensayos aplicables a los PLC´s y sus periféricos
  - Definir los lenguajes de programación de uso más corriente, las reglas sintácticas y semánticas, el juego de instrucciones fundamental, los ensayos y los medios de ampliación y adaptación de los equipos.
- Biodiversidad y recursos naturales

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

- El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras.
- Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional.

## **Marco Conceptual**

### ***Sistemas de control***

Las teorías de control que se utilizan habitualmente son la teoría de control clásica (también denominada teoría de control convencional), la teoría de control moderno y la teoría de control robusto como menciona en su libro(Ogata, 2010).

- ***Control***

Controlar un proceso consiste en mantener constantes ciertas variables, prefijadas de antemano. Las variables controladas pueden ser, por ejemplo: Presión, Temperatura, Nivel, Caudal, Humedad, etc.

- ***Planta***

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una

operación particular. En este caso la planta será cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial).

- **Proceso**

El proceso es cualquier operación que se va a controlar. Algunos ejemplos son los procesos químicos, económicos, biológicos, etc.

- **Sistema de Control**

Un sistema de control es el conjunto de elementos, que hace posible que otro sistema, proceso o planta permanezca en un valor establecido.

- **Variable controlada**

La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla

- **Variable manipulada**

Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada

- **Perturbación**

Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.

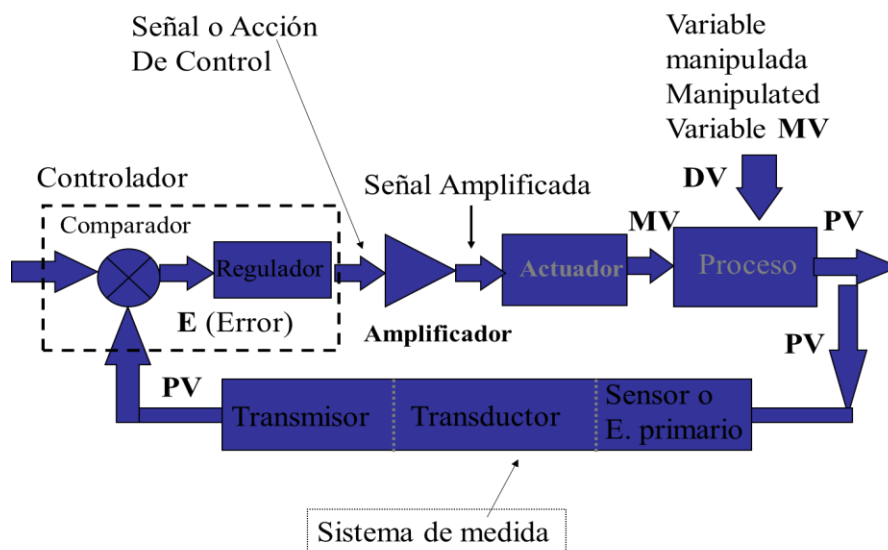
- **Modelo Matemático**

Se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien.

- **Elementos de un sistema de control**

**Figura 1**

*Elementos de un sistema de control*



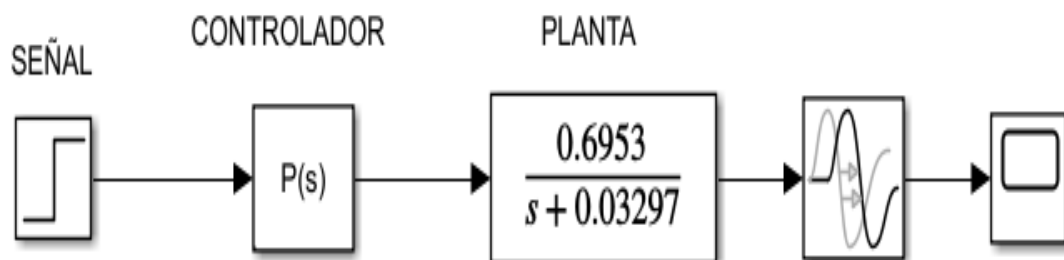
*Nota.* Tomado de Katsuhiko Ogata

**Sistemas de control de lazo abierto.** El sistema en el que la salida no afecta la operación de control se denomina sistema de control de bucle abierto. En otras palabras, en un sistema de control de lazo abierto, la salida no se mide y se devuelve para compararlo con la entrada. Un ejemplo práctico es la lavadora. La lavadora de remojo, lavado y centrifugado funciona cada hora. La máquina no mide la señal de salida, es la limpieza de la ropa. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le

corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Tenga en cuenta que cualquier sistema de control que opere en función del tiempo es un bucle abierto. Por ejemplo, el control de flujo que utiliza la señal activa basada en tiempo es otro ejemplo de control de bucle abierto.

## Figura 2

*Control en lazo abierto*

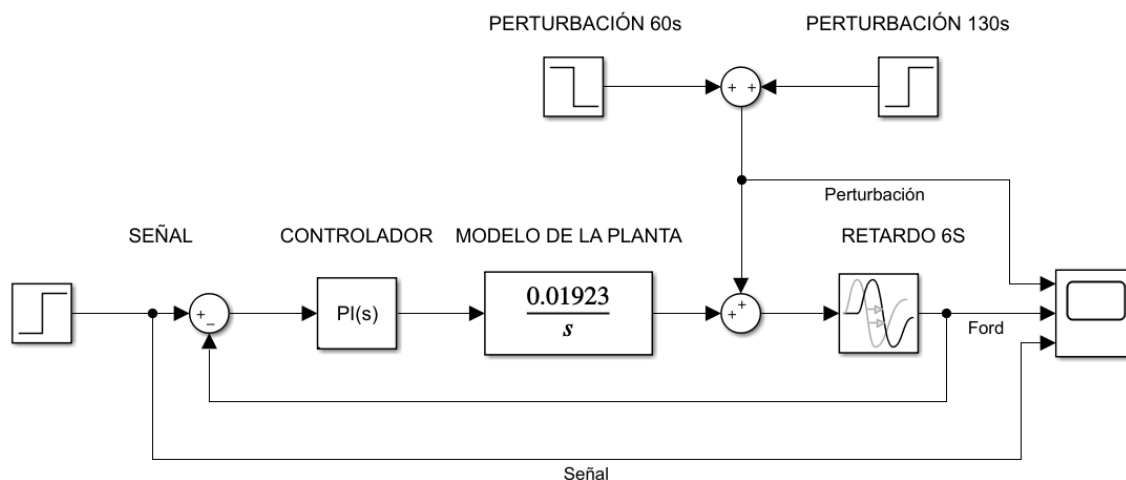


**Sistemas de control de lazo cerrado.** Este tipo de estrategia de control es también denominada control por retroalimentación (feedback). En él se miden las variables con instrumentos colocados en línea, y estas mediciones son usadas para calcular la entrada de control en forma automática mediante el controlador. Es un tipo de control más complicado, pues se necesita tener conceptos de teoría de control, se

mide y se corrige continuamente en el tiempo; por ejemplo, en un sistema de un biorreactor donde se desea hacer control de la concentración de biomasa, esta se mide continuamente en el tiempo, y el controlador se encarga de corregir en tiempo continuo las desviaciones que resulten debido a perturbaciones en el sistema. En el control por retroalimentación, se puede establecer un óptimo control aun si no se conoce todo, si se presentan errores en la estimación y en la modelación. En este caso, es importante resaltar que cualquier estrategia de control clásico que debe utilizarse necesita de un modelo que represente las dinámicas del proceso para ser usado mediante simulaciones en el proceso de sintonización de parámetros del controlador como menciona(Rivera Barrero et al., 2014).

**Figura 3**

*Control de lazo cerrado*



### **Sistemas de primer orden**

Considérese el sistema de primer orden de la Ecuación 1, Físicamente, este sistema representa un circuito *RC*, un sistema térmico o algo similar. Presenta un diagrama de bloques simplificado. La relación entrada-salida se obtiene mediante (Ogata, 2010).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (1)$$

2.2.2.1 Respuesta impulso unitario de sistemas de primer orden. Para la entrada impulso unitario,  $R(s)=1$  y la salida del sistema de la Ecuación1(a) pueden obtenerse

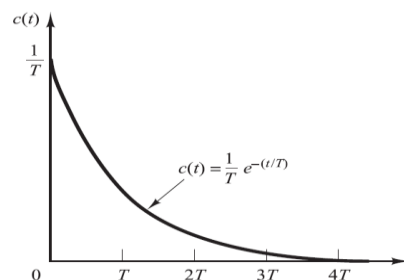
$$\text{como: } C(s) = \frac{1}{Ts+1}$$

La transformada inversa de Laplace de la Ecuación resultante se obtiene como resultado:

$$C(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T} \quad (2)$$

#### **Figura 4**

*Respuesta a impulso unitario del sistema*



*Nota.* Tomado de (Ogata, 2010)

### ***Acciones básicas de control***

En los sistemas de control automático, la entrada al controlador es la señal de error es la diferencia entre el valor deseado de la salida y su valor real. El controlador genera la señal de control que actúa sobre el proceso tendiendo a minimizar el error. Se llama acción de control a la forma en la que el controlador genera la señal de control  $u(t)$  a partir de la señal de error  $e(t)$ . La acción de control puede ser representada por una función  $f$  que obtiene la relación existente entre ambas señales como menciona (Neco Garcia, 2013).

$$\mathbf{u(t) = f(e(t))} \quad (3)$$

### ***Reguladores tipo P e I***

Según Neco Garcia, (2013) el regulador más simple de todos es el de acción proporcional o regulador P, cuya señal de control o salida es proporcional a la entrada o señal de error, es decir, si  $e(t)$  y  $u(t)$  son la entrada y la salida del regulador respectivamente, se tiene:

$$\mathbf{u(t) = Kp \cdot e(t)} \quad (4)$$

Donde  $Kp$  es una constante ajustable que se denomina ganancia del regulador proporcional.

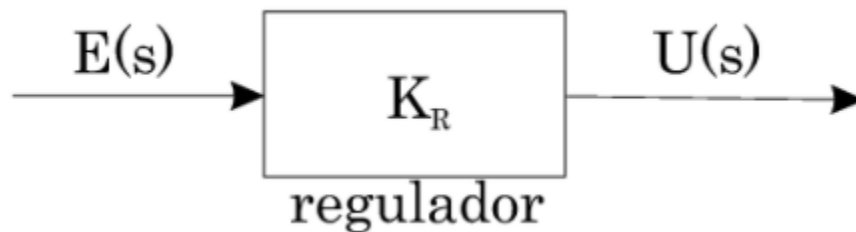
Despejando se puede obtener la función de transferencia de este regulador  $G(s)$  como:



$$Gp(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (5)$$

**Figura 5**

*Regulador tipo P*



*Nota.* Tomado de (Neco Garcia, 2013)

Un regulador de tipo proporcional permite variar la ganancia en bucle abierto del sistema, con lo que sólo se podrá conseguir un débil compromiso entre el comportamiento dinámico y la precisión del sistema. Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de potencia que se use, el regulador P es esencialmente un amplificador con una ganancia ajustable. (Neco Garcia, 2013)

La acción de control P es un control eficaz (de hecho, se usa con mucha frecuencia) pero su concepción es muy pobre ya que necesita la presencia de error para actuar. Es, por tanto, un error “actual” en el sentido de que su acción depende del valor actual del error en cada instante. En el regulador de acción integral o regulador I, la señal de control es proporcional a la integral de la señal de error o entrada. Si  $e(t)$  y  $u(t)$  son la entrada y la salida del regulador respectivamente, se tiene:

Despejando se puede obtener la función de transferencia de este regulador  $G_R(s)$  como:

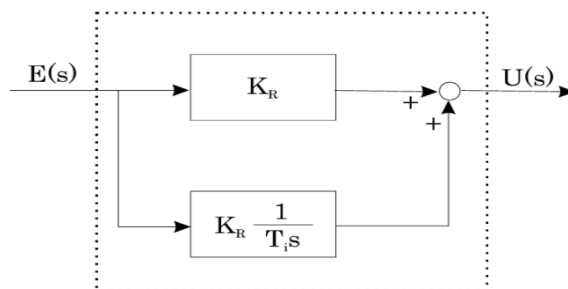
$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

### **Regulador tipo PI**

Según Neco García(2013), un regulador proporcional integral o regulador PI combina los efectos proporcional (P) e integral (I). Como se ha visto anteriormente, con la acción proporcional se consigue una acción de control rápida pero no lo suficientemente precisa. Con la acción integral se consigue una buena precisión, pero la acción de control es lenta. Con los reguladores PI se pretende combinar las ventajas de ambos reguladores en un solo regulador. La señal de salida de un regulador PI varía proporcionalmente a la señal de entrada y a la integral de ésta respecto al tiempo. Si  $e(t)$  y  $u(t)$  son la entrada y la salida al regulador PI respectivamente, entonces se cumple:

### **Figura 6**

#### *Regulador tipo PI*



*Nota.* Tomado de (Neco Garcia, 2013)

Una función de transferencia como la dada por la expresión dada, puede implementarse con las denominadas redes de atraso de fase<sup>1</sup> constituidas, por ejemplo, con componentes pasivos de tipo RC y un amplificador. La función de transferencia de este tipo de redes viene dada por:

$$R(s) = \frac{T_s + 1}{\beta T_s + 1}, \quad \beta > 1. \quad (7)$$

Cualquier estudio sobre control de procesos debe empezar por distinguir los diferentes conceptos de «proceso». Desde el punto de vista de producción, se conoce generalmente como un lugar donde materia, y muy a menudo energía, son tratadas para dar como resultado un producto deseado o establecido. Por ejemplo, son procesos de producción: reactores, hornos, intercambiadores de calor, etc.

Desde un punto de vista de control, su significado es más específico. Un proceso es un bloque que se identifica porque tiene una o más variables de salida de las cuales es importante conocer y mantener sus valores. Como consecuencia estas variables han de ser controladas actuando sobre otra serie de variables denominadas manipuladas, según (José Acedo Sánchez, 2003).

### ***Procesos industriales***

Existen dos modelos de procesos industriales que se clasifican según su respuesta: Autorregulados e integrantes.

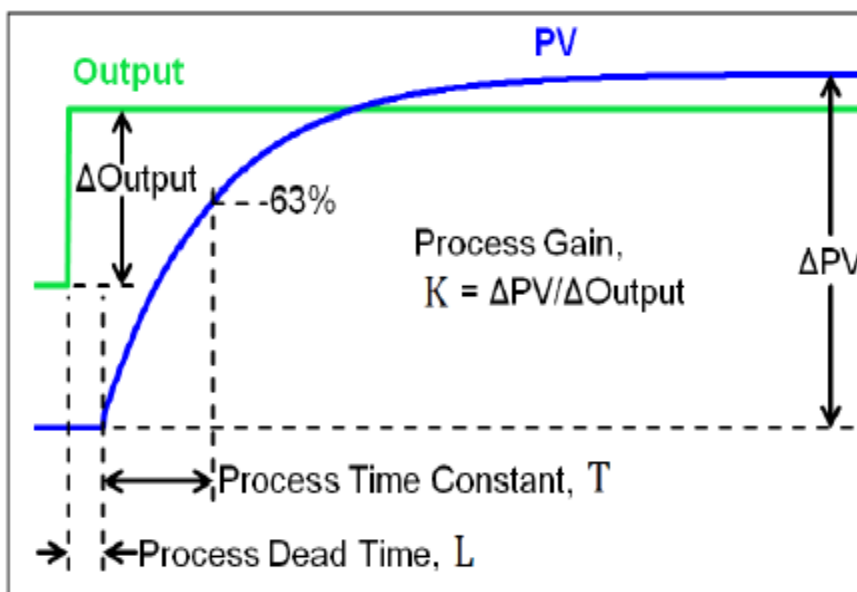
---

<sup>1</sup> Una red de adelanto de fase, al ser sometida a una excitación de tipo senoidal, proporciona a la salida otra señal senoidal de la misma frecuencia y con un atraso de fase respecto de la excitación que es función de la frecuencia.

**Proceso autorregulado.** La característica del proceso de autorregulación es su capacidad inherente para establecer un nuevo valor para la variable de proceso sin ningún ajuste por parte del controlador. En otras palabras, solo hay un valor de variable de proceso para cada valor de salida posible. La velocidad de respuesta inherente del proceso de control de flujo de fluido obviamente lo hace autorregulador, ¡el flujo autorregulador generalmente ocurre segundos después del movimiento de posición de la válvula y muchos procesos además del flujo de fluidos también se autorregulan, según(Villajulca, 2019)

**Figura 7**

*Respuesta de un Proceso Autorregulado.*



*Nota.* Tomado de (Coughran, 2021)

De acuerdo a las características del proceso tomado en la Figura 7 se determina que la función de transferencia de un modelo FOPDT (First Order Plus Dead Time):

$$G_{(s)} = \frac{K * e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad 8$$

En dónde:

T = Constante de tiempo del Proceso.

L = Tiempo muerto del proceso.

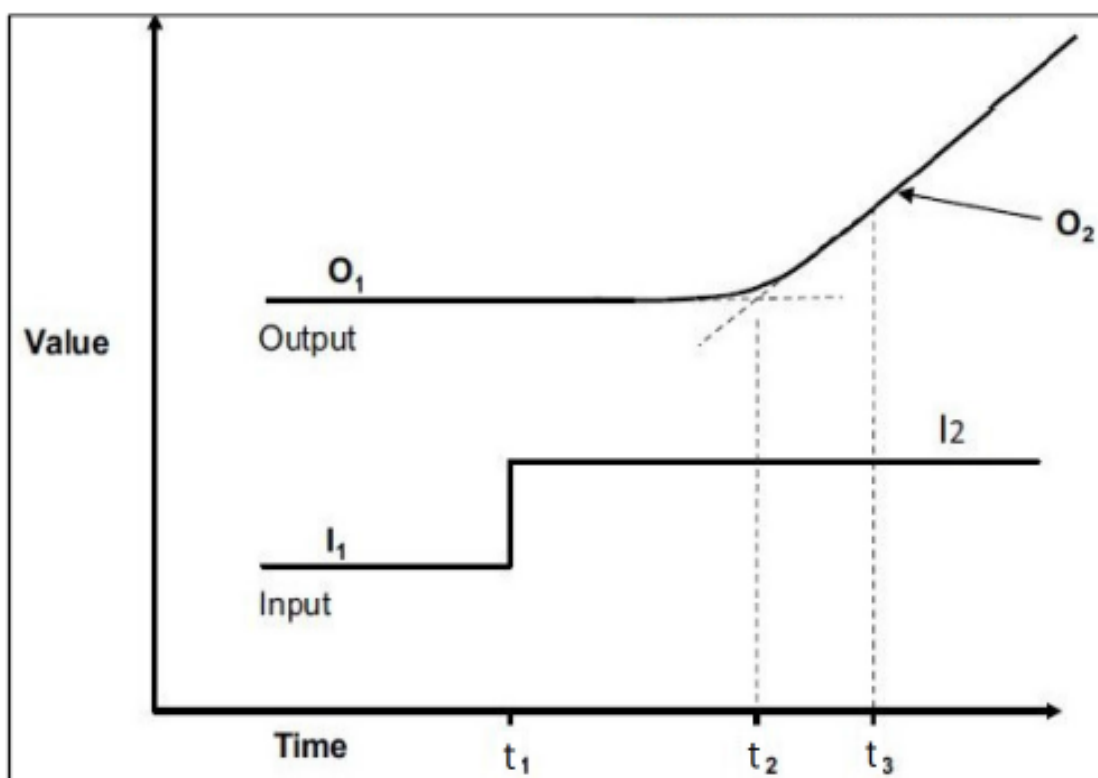
La ganancia K se obtiene a partir de:

$$G_{(s)} = \frac{\Delta PV}{\Delta Output} \quad 9$$

**Proceso integrante.** Según (O. E. Camacho et al., 1998), describe la integración de procesos como un sistema caracterizado por un crecimiento constante de la variable del proceso, es decir, su salida toma la forma de una pendiente, cuando se realiza un cambio en el valor de referencia. Por lo general, esto sucede cuando hay un desequilibrio entre la energía de flujo de entrada y salida del proceso.

**Figura 8**

*Respuesta de un Proceso Integrante*



*Nota.* Tomado de (Otero & Optimo Group Inc., 2020)

Tomando en cuenta las características del proceso integrante indicadas en la Figura 8 se puede representar el modelo matemático con la siguiente ecuación:

$$G_{(s)} = \frac{k * e^{-Ls}}{s} \quad (10)$$

En dónde la ganancia del proceso integrante  $K$  se obtiene a partir de:

$$K = \frac{m}{t_3 - t_2} \quad (11)$$

Para obtener  $m$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$m = \frac{02-01}{t3-t2} \quad (12)$$

El tiempo muerto está representado por:

$$L = t2 - t1 \quad (13)$$

### **Controladores PID**

El controlador PID es el algoritmo de control más común, se basa en la simple implementación de la idea de realimentación, esta puede reducir los efectos producidos por las perturbaciones logrando que un proceso siga adecuadamente a su punto de consigna, gracias a estas ventajas el controlador PID es utilizado en más del 95 por ciento de lazos de control.

Los controladores PID han sobrevivido a muchos cambios de tecnología, que van desde la neumática a los microprocesadores pasando por los tubos de vacío, los transistores, y los circuitos integrados. El microprocesador ha tenido una influencia crucial sobre el controlador PID. Prácticamente todos los controladores PID fabricados hoy día se basan en microprocesadores.

Esto ha creado oportunidades para proporcionar características adicionales tales como sintonía automática, planificación de ganancia, adaptación continua y diagnóstico, además se implementa de muchas formas diferentes, como un controlador único o como parte de un paquete DDC (Control Digital Directo) o un sistema de control de procesos distribuido jerárquico. (Åström & Hägglund, 2009).

A continuación se describe la ecuación del control proporcional integral derivativo (PID):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Donde:

$K_p$  es ganancia proporcional

$T_i$  es el tiempo integral

$T_d$  es el tiempo derivativo

$e(t)$  es el error

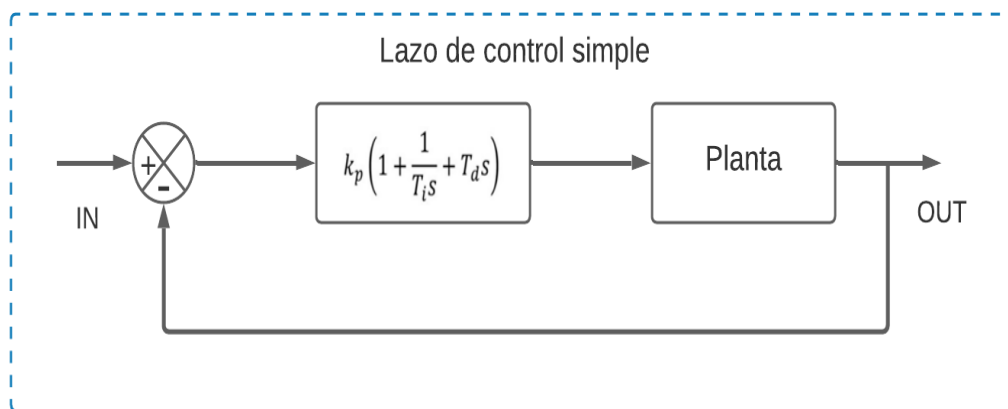
### ***Métodos de sintonía de controladores PID***

La figura 9, muestra la estructura de un lazo de control PID de una planta, si se puede obtener un modelo matemático de la planta, entonces es posible aplicar diversos métodos para determinar los parámetros de sintonía del controlador que cumplirán las especificaciones del sistema. Sin embargo, si el modelo matemático de la planta no puede obtenerse fácilmente, entonces no es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. Para solucionar este problema se debe recurrir a enfoques experimentales para ajustar los controladores PID (Katsuhiko Ogata, 2002).



**Figura 9**

*Estructura de un lazo de control simple*



*Nota.* Tomado de Katsuhiko Ogata

- **Método de sintonía por Tanteo (lazo cerrado):** De acuerdo a Antonio Creus en su libro instrumentos industriales ajuste y calibración:
  - Se basa en poner en marcha el proceso con el instrumento en automático y después provocar perturbaciones para cada ganancia tanteada (las acciones integral y derivada, caso de que las tenga el instrumento, se fijan en su valor mínimo). Cada perturbación se efectúa generalmente por cambio del punto de consigna y vuelta al mismo valor (Creus Sole, 2008).
  - Ajuste de los controladores proporcionales, se empieza con una ganancia pequeña y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Ajuste de los controladores con banda P + I. Con la banda integral en  $\infty$  minutos/repetición, se sigue el procedimiento descrito antes para obtener el ajuste de la ganancia proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximado de 0,25. Como la acción integral

empeora el control y al poseerla el instrumento, su ganancia debe ser un poco menor, se disminuye ligeramente la ganancia y a continuación se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos. La última ganancia ensayada se aumenta ligeramente (se reduce ligeramente la última banda proporcional).

- Ajuste de los controladores P + I + D, con la banda derivada en 0 y la integral en  $\infty$  minutos/repetición, se aumenta la ganancia proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25. Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada antes hasta acercarse al punto de inestabilidad. Se aumenta la banda derivada en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional con mejores resultados en el control.
- **Método de sintonía de Ziegler and Nichols:** Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$  tiempo integral  $T_i$ , y el tiempo derivativo  $T_d$ , basado en las características de la respuesta de una planta dada (Ogata, 2002).

Este método al igual que los mencionados anteriormente se basa en los parámetros de un sistema de primer orden más retardo, mostrado en la ecuación. Los parámetros de sintonía del controlador están en función de los parámetros del modelo mencionado, estas ecuaciones se muestran a continuación:

**Tabla 2***Parámetros de sintonía del controlador*

TIPO DE CONTROLADOR	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

*Nota.* Tomado de (Ogata, 2010)

- **Métodos de sintonía para procesos Integrantes**

Si se desea aplicar un controlador PI ó PID para procesos integrantes se aplicará los siguientes métodos de sintonía los mismos que se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 3***Métodos de sintonía para un controlador PID para procesos integrantes.*

Método	$K_c$	$T_i$	$T_d$
<b>Ford</b>	$\frac{1.2}{KL}$	$2L$	$0.37L$
<b>Astrom - Hagglund</b>	$\frac{0,94}{KL}$	$2L$	$0.5L$

<b>Método</b>	<b>Kc</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>Hay</b>	$\frac{0,4}{KL}$	$3,2L$	$0.8L$
<b>Zou – Brigham (<math>\lambda = 3\tau_m</math>)</b>	$\frac{2}{K(\lambda + 0.5L)}$	$2\lambda + L$	$\frac{\lambda + 0.25L}{2\lambda + L} L$

Nota. Tomado de (O'Dwyer, PID Controller Structures, 2006)

### **Autómatas controladores logoV8 de siemens**

El autómata programable es un dispositivo destinado a controlar las operaciones secuenciales de cualquier tipo de proceso. Hay que resaltar que programable significa que tiene absoluta capacidad de adaptación, es decir, que en cualquier momento o circunstancia se podrá adecuar a las necesidades de la instalación. El uso más generalizado del autómata programable es el industrial. Se podría utilizar perfectamente un autómata tipo compacto para realizar algunas funciones, pero en cierta forma, impulsando la incorporación de este elemento como controlador de la instalación eléctrica. El sistema por autómata programable PLC (Programmable Logic Controller), Controlador Lógico Programable, es un sistema centralizado que está orientado a la gestión de pequeñas y medianas instalaciones. (Moreno Zaragoza & Zubiaurre Lusa, 2014)

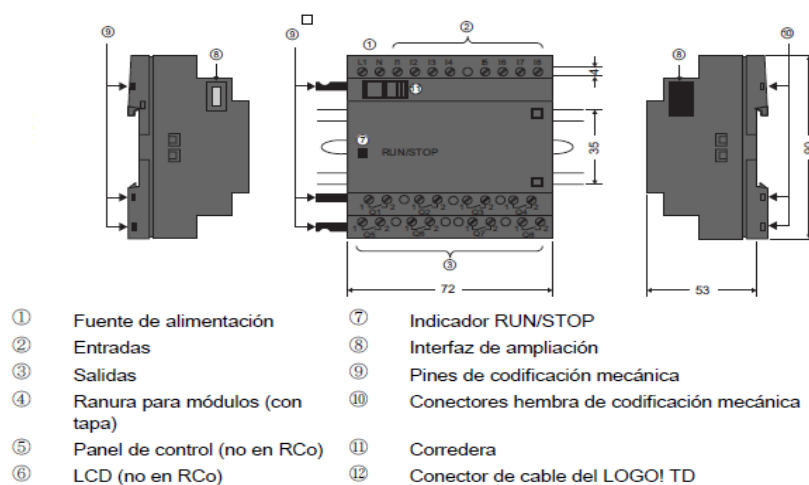
Estructura externa se refiere al aspecto físico exterior del mismo, y hay que diferenciar dos tipos de configuraciones o clases: compacta y modular. Respecto a su disposición externa, los autómatas pueden contener varias de estas secciones en un mismo módulo o cada una de ellas separadas por diferentes módulos. El acoplamiento del autómata a los cuadros o armarios eléctricos puede hacerse por cualquier sistema

normalizado: carril DIN, panel o placa perforada, etc. (Moreno Zaragoza & Zubiaurre Lusa, 2014)

**Configuración compacta.** Se caracteriza porque sus elementos disponen de poca capacidad de E / S (Entradas / Salidas). Debido a su reducido tamaño y su compactación, la relación de entradas y salidas también se ve reducida. Tiene como característica principal la de disponer de un bloque en el que se encuentran todos los elementos que lo constituyen, en la figura 8. Dispone de dos posibilidades de programación: tener una unidad de programación fija o ser programado por un ordenador; en cualquiera de los dos casos los dispositivos de comunicación entre el autómatas y el elemento de programación serán diferentes. (Moreno Zaragoza & Zubiaurre Lusa, 2014)

**Figura 10**

*Autómata compacto*



*Nota.* Tomado del manual: 6ED1050-1AA00-0DE7 (Siemens)

Estructura interna Está constituida por un conjunto de tarjetas o de circuitos en los que se han montado componentes electrónicos integrados, que se alojan en cajas para ser protegidos mecánicamente y poder intercambiarlas con comodidad. Las conexiones entre las diferentes tarjetas se realizan a través del bus de datos, que dependiendo del tipo de autómatas se realizará de distinta forma: cableado, por circuito impreso, por par trenzado, etc.

### ***La Hidroponía***

Hidroponía, es un conjunto de técnicas que permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo. La hidroponía permite en estructuras simples o complejas producir plantas principalmente de tipo herbáceo aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no, etc. A partir de este concepto se desarrollaron técnicas que se apoyan en sustratos (medios que sostienen a la planta), o en sistemas con aportes de soluciones de nutrientes estáticos o circulantes, sin perder de vista las necesidades de la planta como: La temperatura, humedad, agua y nutrientes. La palabra hidroponía deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo), lo cual significa literalmente trabajo en agua. Sin embargo, en la actualidad se utiliza para referirse al cultivo sin suelo. La hidroponía es una herramienta que permite cultivar plantas sin tierra. El medio de cultivo hidropónico es un sistema aislado del suelo, que se utiliza para cultivar plantas que pueden crecer al ser abastecidas con las necesidades de agua nutritiva a través de agua y solución nutritiva. Con técnicas de cultivo sin suelo, se pueden obtener vegetales saludables y de buena calidad, lo que permite un uso más eficiente del agua y los nutrientes. Por experiencia, los rendimientos por unidad de área cultivada son altos debido a densidades más

densas, mayores rendimientos por planta y uso eficiente de los recursos de agua, luz y nutrientes. No es un método moderno de cultivo de plantas, sino una técnica antigua; En la antigüedad, hubo culturas y civilizaciones que utilizaron esta metodología como medio de subsistencia. Esta forma de cultivo a menudo se combina con grandes invernaderos para el cultivo y el uso de las tecnologías más complejas; sin embargo, el origen de la hidroponía es muy simple en su implementación. El desarrollo actual de las técnicas hidropónicas se basa en el uso mínimo del espacio, el mínimo consumo de agua y el máximo rendimiento y calidad como menciona (Beltrano & O. Gimenez, 2015).

**Sistemas hidropónicos.** Se menciona los siguientes cultivos

- a) Cultivo sin sustrato, donde el cultivo se realiza sin sustrato (Nutrient Solution Recirculating Technique (NFT), Aeroponics), en donde “los nutrientes disueltos en agua son transportados directamente a la parte expuesta de las raíces. En este sistema, el agua se airea o arraiga y la solución se puede exponer al aire. En esta técnica, se proporciona soporte al árbol con ganchos o cables metálicos. Algunos ejemplos de este tipo de sistema hidropónico son “NFT o Ingeniería de Película de Nutrientes”, “Tanque de Nutrientes”, “Sistema de Nebulización” entre otros.
- b) Cultivo sintético, donde los nutrientes solubles en agua son transportados a las raíces. En este sistema, las raíces de las plantas crecen en un medio sólido inerte capaz de retener suficiente humedad, pero drenando el exceso de agua y permitiendo una aireación adecuada. Algunos de los sólidos que se utilizan en este tipo de sistemas son perlita, vermiculita, arena, arcilla expandida, grava, musgo, cascarilla de arroz, turba, etc. Para un sistema de cultivo hidropónico, es

importante que la solución nutritiva contenga todos los elementos necesarios y los ingredientes correctos. La composición exacta depende de la planta y su entorno como menciona (Beltrano & O. Gimenez, 2015).

**Nutrient Film Technique (NFT).** Tecnología de película de nutrientes El sistema de recirculación de solución de nutrientes "NFT" fue desarrollado en el Glasshouse Crop Institute, Reino Unido, en la década de 1960. El principio de este sistema hidropónico consiste en la circulación continua de una capa delgada de solución de nutrientes que pasa a través del sistema hidropónico. raíces de la planta, sin perderse ni liberarse al exterior de la solución nutritiva, por lo que se forma en un sistema cerrado, como menciona(Gilda Carrasco, Ph. D. & Juan Izquierdo, Ph. D., 1996)

Se está estableciendo un sistema "NFT", en varias formas, especialmente en las regiones áridas de América Latina. Sin embargo, la técnica también puede extenderse a productores o empresas en otras condiciones agroecológicas. Para ello, es importante tener un conocimiento previo de las técnicas hidropónicas comunes o periurbanas y disponer de una inversión superior a la necesaria para las mismas, con el fin de aumentar la capacidad de producción por unidad de superficie y tiempo de cultivo.

Una de las ventajas que ofrece el sistema "NFT" es una mayor eficiencia en el uso de elementos minerales necesarios para el crecimiento de las plantas, agua y oxígeno. A diferencia de los populares sistemas hidropónicos con sustratos sólidos "flotantes", el "NFT" maximiza el contacto directo de las razas con una solución nutritiva continuamente renovada y así se acelera el crecimiento si se puede obtener en el hábitat. ciclos de cultivo. En ausencia de medios, se evitan las labores de fumigación, así como se prefiere el establecimiento de altas densidades de siembra.



Entre las desventajas reportadas para el sistema "NFT", la necesidad de una mayor inversión inicial; sin embargo, debido a que está hecha de materiales de fácil acceso, se reduce el costo de implementación, convirtiéndola en una técnica que compite con otras en el sistema de cultivo forzado como menciona(Gilda Carrasco, Ph. D. & Juan Izquierdo, Ph. D., 1996).

### **Figura 11**

*Cultivo hidropónico (NFT)*



## **Importancia del pH y de la CE en el desarrollo de la planta.**

### **Conductividad eléctrica (ce)**

La concentración de cada elemento nutritivo en solución puede determinarse mediante análisis químico. Además, a nivel de mediana empresa, el funcionamiento del sistema "NFT" requiere realizar un test diario o una estimación de la concentración de los elementos nutricionales. En el primer caso, se vuelve engorroso y costoso tomar una muestra de la solución y llevarla al laboratorio para su análisis, además de no conocer el verdadero estado de la solución a tiempo.

La efectividad de usar un estimador de conductividad (CE) se basa en el concepto de la relación entre la conductividad de la solución y la concentración de las sales disueltas, así como en el uso de la solución nutritiva de los elementos esenciales. Por ello, uno de los éxitos del sistema "NFT" radica en la selección de la formulación completa de la solución nutritiva. La unidad de CE es el mili siemens (mS/cm) antes conocido como miliohms (mmho), pero en hidroponía para efectos prácticos se trabaja con el coeficiente de conductividad eléctrica (Fc), el cual se define como: coeficiente de conductividad

$(F_c) = EC \text{ (mS/cm)} \times 10$ , es decir  $F_c = 20$  equivalente a 2 mS/cm.

El rango de conductividad normalmente requerido para el crecimiento completo de la planta es  $F_c$  de 15 a 30. El uso de un valor final más bajo de este rango o un valor más alto dependerá de la especie y los requisitos de la planta. En función de su modo de crecimiento, así como de la CE del agua, se prepara la solución nutritiva

Por ejemplo, para una planta de lechuga recién plantada (etapa de crecimiento con 5 hojas verdaderas), el coeficiente de conductividad no debe ser superior a 15. Por otro lado, se debe tener cuidado de no exceder el límite superior de 30, ya que debido a una mayor concentración de elementos minerales disueltos en la solución nutritiva, la absorción de agua, y por ende la de nutrientes, disminuye afectando así el crecimiento del cultivo como indica (Gilda Carrasco, Ph. D. & Juan Izquierdo, Ph. D., 1996).

La conductividad se mide con un medidor manual o automático. Calibre el instrumento de acuerdo con las instrucciones del proveedor.

## Figura 12

*Trasmisor de conductividad*



*Nota.* Tomado de (Control-Meter-EC510, s. f.)

## **pH**

Otro parámetro que debe controlarse para mantener la disponibilidad de nutrientes en la solución nutritiva es el pH, es decir, qué tan ácida o alcalina es la solución. El rango de pH en el que los nutrientes están disponibles es de 5,5 a 7. Para medir el pH se utiliza un medidor de mano, el cual debe ser calibrado durante todo el período de uso, según el aviso comercial

### **. Las correcciones de pH**

Generalmente se realizan para acidificar la solución dentro del rango óptimo indicado anteriormente. Esto se explica porque cuando se suma la masa consumida, se agrega agua hasta alcanzar la masa inicial, aumentando el pH. Para bajar el pH a un valor mínimo de 5,5, se añade una solución ácida formada por una mezcla de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido orto fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) en una proporción de 3:1, preparada en una proporción del 5%. Es decir, al preparar 10 litros de solución con la mezcla especificada, a los 9500 cc de agua que contiene un recipiente se le añaden 380 cc de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y 120 cc de ácido orto fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Si no se dispone de ninguno de estos ácidos, se debe preparar una solución con el ácido existente, añadiendo 500 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) o ácido orto fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) a 9.500 cc de agua.

La manipulación de la solución ácida, así como la preparación de la solución debe ser realizada por una persona responsable, que utilice gafas de seguridad y guantes para evitar quemaduras por ácido. Además, debe asegurarse de que no se derrame ácido concentrado o solución ácida. Tampoco debe olvidarse que, durante la preparación, siempre se debe agregar ácido a un volumen de agua previamente

asentado en el recipiente del recipiente. De lo contrario, puede ocurrir una explosión.

Los ácidos utilizados no son necesariamente productos puros, por el contrario, es preferible utilizar ácidos suministrados comercialmente con un 85% de pureza. También son menos costosos.

Si es necesario alcalinizar la solución nutritiva, es decir, aumentar el pH al rango óptimo, se debe preparar una solución de hidróxido de potasio base (KOH) al 10% y luego agregar una pequeña cantidad a la solución. Los gránulos de este compuesto se añadieron a 500 cc de agua y se agitaron continuamente hasta que se disolvió la sal. Luego llene con el agua restante hasta obtener 1 litro de solución como menciona(Gilda Carrasco, Ph. D. & Juan Izquierdo, Ph. D., 1996).

### Figura 13

*Transmisor de pH*



*Nota. Tomado de (controlador-de-pH, s. f.)*

**Ventajas de las plantas hidropónicas.:**

- Las plantas están libres de plagas, bacterias, hongos y contaminación.
- Reducir los costos de producción.
- Independiente de los fenómenos meteorológicos.
- Permite la producción de cultivos fuera de temporada Menos espacio y capital para producir más.
- Ahorra agua, se puede reciclar. Ahorre en fertilizantes y pesticidas. Evitar la maquinaria agrícola (tractores, gradas, etc.).
- Higiene en el manejo de cultivos.
- Temporadas anteriores.
- Alta tasa de automatización.
- Cada vez mejor calidad del producto.
- Alto rendimiento por unidad de superficie
- Acelera el proceso de cultivo
- Capacidad de cosechar el mismo cultivo varias veces al año
- Ahorra en el consumo de agua(Beltrano & O. Gimenez, 2015)

***Lechuga***

Lactuca sativa L.

La lechuga es considerada una excelente verdura de hoja, gracias a sus altas cualidades culinarias en ensaladas frescas. Pertenece a la familia de las compuestas. Se cultiva en todo el mundo en diferentes sistemas de cultivo, al aire libre, en invernaderos, en suelo y también en sistemas hidropónicos. Esta es la principal especie de hoja cultivada en el sistema "NFT", ya que se pueden obtener hojas de lechuga de alta calidad en varias cosechas al año. (Gilda Carrasco, Ph. D. & Juan Izquierdo, Ph. D., 1996)

La lechuga se consume en cualquier época del año, por lo que la demanda de este producto en el mercado siempre es alta. Es una planta rica en vitaminas principio; Contiene 9,8% de agua, 1,2% de proteína, 0,2% de grasa y 2,9% de carbohidratos. Raw tiene una alta dosis de vitaminas A, B, C y E, así como de minerales como indica(JAPON QUINTERO, s. f.-a).

El tiempo de cultivo típico es de 5.060 días para variedades tempranas y 7.080 días para variedades tardías, promediando desde la siembra hasta la cosecha. La lechuga es una planta muy adaptable a diferentes climas. Puede vivir a una temperatura de 0°C; pero cuando la temperatura desciende por debajo de los 6°C, a menudo se sienten sus efectos, que, si se prolongan, provocan lesiones foliares. Por debajo de los 5°C, la lechuga no echa raíces, pero sí a partir de los 10°C. Sin embargo, es menos tolerante a temperaturas altas que a temperaturas relativamente bajas. Los climas extremadamente cálidos pueden causar la dispersión de tallos y flores, lo que a menudo se denomina "floración" de la planta. La temperatura media óptima para la lechuga está entre 15 y 20 °C como menciona(JAPON QUINTERO, s. f.-b).

**Figura 14**

*Lechuga crespa*



*Nota. Tomado de (Lechuga-crespa, s. f.)*



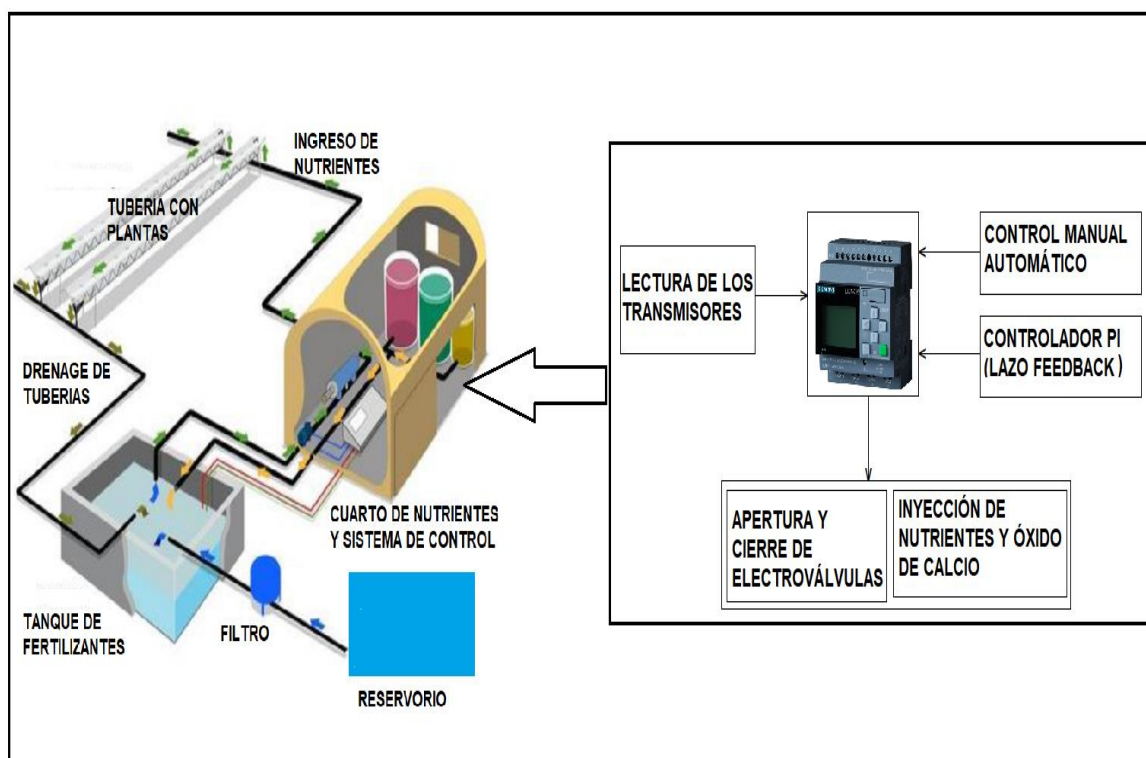
## Capítulo iii

### Metodología de la investigación

Para la automatización del sistema automático de las variables NFT, orientado a la distribución de los nutrientes utilizados para el desarrollo de la lechuga, se consideró la investigación bibliográfica basado en artículos y libros de los cuales se obtuvo la información necesaria para la presente investigación, en la figura 15 se presenta el esquema general del proyecto, el que será detallado en el presente capítulo.

**Figura 15**

*Esquema del proyecto*

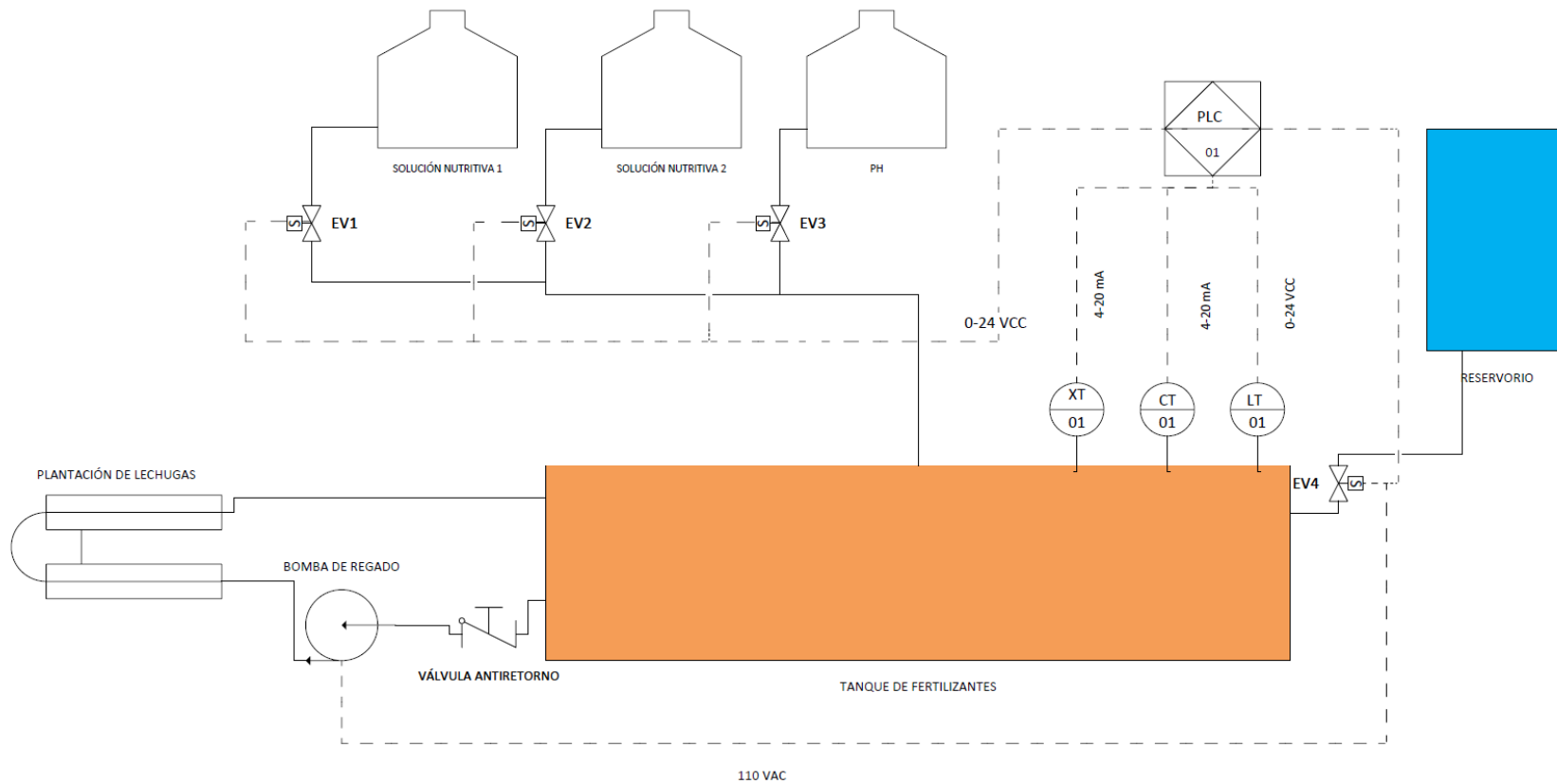


### **Diseño del diagrama P&ID de la automatización de las variables nutrient film technique en el cultivo hidropónico de lechugas**

En el sistema se consideran dos tanques, el primero corresponde al tanque de fertilizantes en donde se encuentran todos los nutrientes necesarios para que la planta de lechuga se pueda desarrollar de forma adecuada y el segundo, es un tanque reservorio que permite almacenar agua para el sistema hidropónico sin nutrientes, existe una bomba que permita la recirculación del líquido, los equipos e instrumentos industriales utilizados son: un transmisor de conductividad eléctrica y de pH, un controlador lógico programable. En el diseño se utilizan las normas ISA 5.1 e ISA 5.3, a continuación, se presenta la figura 16, que corresponde al diagrama P&ID del proceso industrial.

Figura 16

Diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de un tanque



### Controlador de conductividad eléctrica (CE)

El transmisor EC-510, sirven para convertir las magnitudes físicas en una señal eléctrica. Es decir, mide la cantidad de sales existentes en el agua dando mediciones normalizadas de salida de 4-20mA, valores de corriente que son enviados al controlador para el proceso de automatización.

El EC-510 medidor de conductividad eléctrica puede adaptarse a una variedad de electrodos de conductividad, establecido por tipo de electrodo de celda de 1 -2000us con un multiplicador de 10, para esto se establece los rangos de 0,01 – 20 ms, un rango permitido para observar la salinidad del agua que para los cultivos hidropónicos está en un rango de 1,5 - 2,2 ms, lo sugerido por los profesionales en hidropónica es de 1,8ms correspondido a 18ms del transmisor de conductividad.

### Figura 17

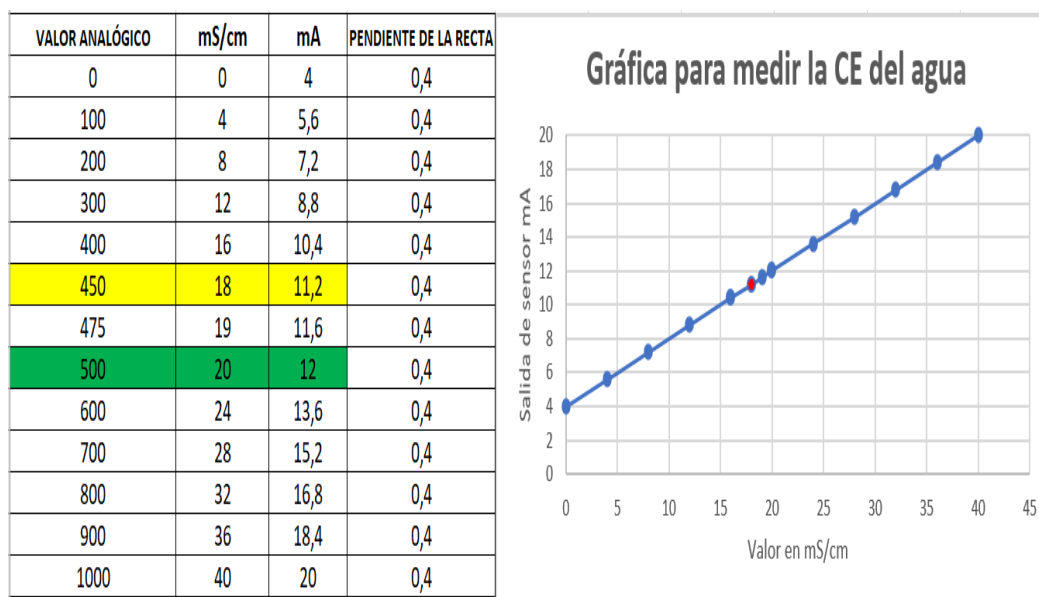
*Transmisor EC-510*



En la siguiente tabla se detalla el funcionamiento del transmisor de conductividad, tomando en cuenta que el controlador está diseñado para medir hasta 4ms, la sonda de prueba entrega valores hasta de 2mS/cm, la variación de la corriente de salida es lineal como se muestra a continuación.

**Tabla 4**

*Medición del transmisor EC-510*



La corriente óptima para el cultivo es de 11,2mA, que corresponde a la medición de 18ms/cm, esto indica una cierta cantidad de nutrientes disueltos en el agua para que la planta pueda absorber y que no tenga ningún tipo de daños en el desarrollo, cuando la conductividad se encuentra muy elevada, la planta tiende a quemarse las hojas y con el tiempo se pudre, cuando la conductividad se encuentra por debajo de los niveles permitidos, la planta de lechuga se marchita y si el nivel no asciende la planta se muere.

### Controlador de potencial de hidrogeniones (pH)

Es la medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución, en los cultivos hidropónico de plantas de lechuga se recomienda que el pH debe encontrarse en el rango de 6 – 7, dando como resultado que el valor óptimo para el desarrollo de la planta es de 6,5. El pH se mide en una escala de 0 a 14. En esta escala, un valor del pH de 7 es neutro, lo que significa que la sustancia o solución disuelta en el agua no es ácida ni alcalina. Un valor del pH menor a 7 significa que es más ácida, y un valor del pH mayor a 7 significa que es más alcalina.

### Figura 18

*Transmisor Meter (PH)*

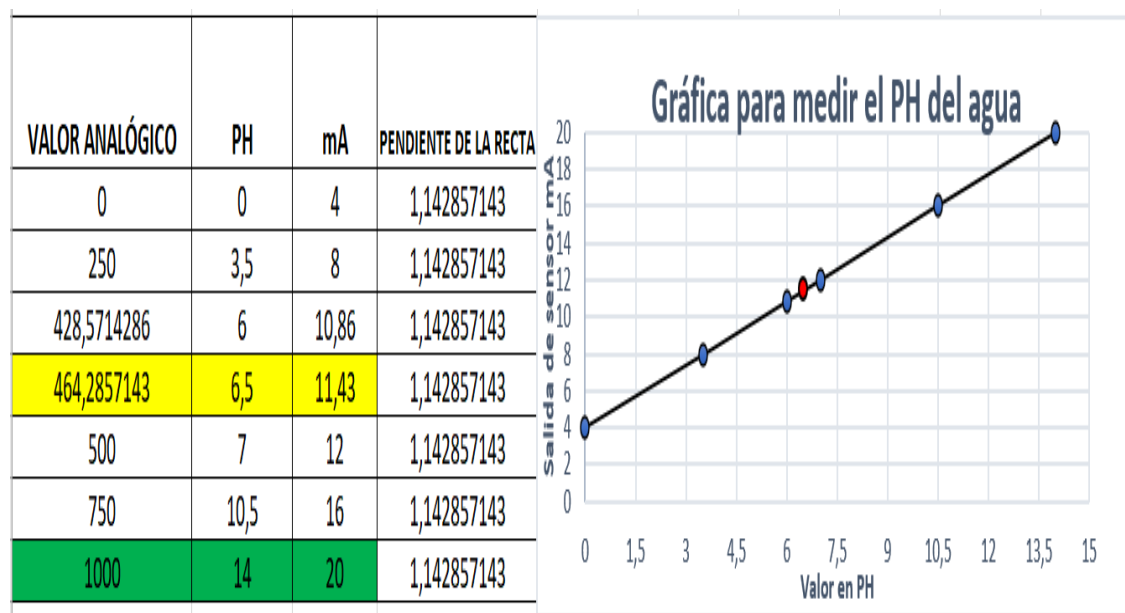


En la siguiente tabla se detalla el funcionamiento del transmisor del potencial de hidrogeniones, tomando en cuenta que el controlador está diseñado para medir hasta

14pH, se tiene una variación de la corriente de salida de 4 – 20 mA en forma lineal, cuando el pH del agua disminuye a 6 se vuelve ácida provocando un pudrimiento de la raíz y matándole; además da origen a la creación de bacterias, hongos, infectando a las demás plantas, cuando el pH se encuentra por los niveles superiores a 7, la planta no desarrolla porque las moléculas de hidrogeno no permite que las raíces de la lechuga puedan absorber los nutrientes necesarios para el crecimiento.

**Tabla 5**

*Medición del transmisor Meter*



El valor óptimo para que la planta se desarrolle es que el pH debe encontrarse en un valor promedio de 6,5. El valor enviado al controlador para el set point es de 464, como se muestra en la tabla 5 para que el sistema interactúe cuando el valor varíe por las diferentes acciones que pueda tener el sistema y el valor establecido varíe.

### **Solución nutritiva(18-18-18-2MgO)**

En hidroponía, todos los elementos esenciales se suministran a la planta disolviendo las sales fertilizantes en agua para preparar una solución nutritiva. La elección de la sal a utilizar depende de un gran número de factores. Las proporciones relativas de iones que deben agregarse a esta preparación se comparan con las proporciones requeridas en la formulación de nutrientes; por ejemplo, una molécula de nitrato de potasio  $\text{KNO}_3$  proporcionará un ion de potasio K y otros iones de nitrato  $\text{NO}_3$  y una molécula de nitrato de calcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  proporcionará un ion de calcio y dos iones de nitrato. Se pueden usar diferentes sales fertilizantes para soluciones de nutrientes con diferente solubilidad, una medida de la concentración de sal que queda en solución cuando se disuelve en agua; Si una sal tiene baja solubilidad, sólo una pequeña cantidad se ha disuelto en agua. En hidroponía, las sales fertilizantes deben ser altamente solubles porque deben permanecer en solución para que las plantas las absorban. Por ejemplo, el calcio puede ser proporcionado por nitrato de calcio o sulfato de calcio; este último es menos costoso, pero su solubilidad es muy baja; por lo tanto, el nitrato de calcio debe ser la sustancia que se utiliza para cubrir todas las necesidades de calcio. El costo de un fertilizante en particular debe considerarse en función de su uso; En general, se recomienda utilizar el llamado grado técnico, que es más caro que el grado agrícola pero tiene una solubilidad mucho mayor como menciona(Llanos Peada, 2001).



**Tabla 6***Solución nutritiva 18-18-18 + 2MgO*

<b>MACRO - NUTRIENTES</b>		
ANÁLISIS	UNIDAD	CONCENTRACIÓN
Nitrógeno total (N)	%	18
Nitrógeno nítrico (N-NO <sub>3</sub> )	%	5
Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>4</sub> )	%	4
Nitrógeno ureico (N-NH <sub>2</sub> )	%	9
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	%	18
Potasio soluble (K <sub>2</sub> O)	%	18
Magnesio soluble (MgO)	%	2
<b>MICRO - NUTRIENTES</b>		
Hierro (Fe)	PPM	1000,0
Manganeso (Mn)	PPM	500,0
Zinc (Zn)	PPM	150,0
Boro (B)	PPM	200,0
Cobre (Cu)	PPM	110.,0
Molibdeno (Mo)	PPM	70,0

*Nota.* Tomado de Agrizon

La solución nutritiva 18-18-18+2MgO, que es completamente soluble en agua, formulado para proporcionar una nutrición completa a las plantas durante todo el

crecimiento de la misma, la solución se acopla a los cultivos de hortalizas, frutas, flores entre otros; para las plantas de lechugas la solución es apropiada desde que inicia el proceso de plantado hasta su cosecha, aprovechando la misma en las nuevas plantas a sembrar.

#### **Ventajas de la solución nutritiva:**

- Totalmente solubles en agua, seguros para ser utilizados con todos los sistemas de riego, aspersión y hidroponía
- Compuesto exclusivamente por nutrientes puros para el desarrollo de las plantas
- Sin cloruro, sodio, u otros elementos perjudiciales
- Enriquecido con altos niveles de macronutrientes
- Enriquecido con altos niveles de micronutrientes

#### **Obtención del modelo matemático**

Para la modelación de la planta se debe tomar en cuenta la inyección de los nutrientes que son necesarios para el desarrollo de la planta, los transmisores envían al controlador una señal en mili Amperios para identificar la cantidad de sales disueltas en el agua.

Los sistemas de primer orden más tiempo muerto son utilizados con mucha frecuencia para representar procesos industriales, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{0,01923}{s} e^{-6s} \quad (15)$$

La ecuación 15 es utilizada para poder expresar matemáticamente de manera muy simple cómo se comporta un proceso o sistema real a lo largo del tiempo cuando se aplica un estímulo a su entrada. De esta forma se puede implementar un controlador para el sistema hidropónico.

Se realiza las mediciones de la variable CE cuando el agua pura sin nutrientes se encuentra en el reservorio, lista para ser distribuida al cultivo hidropónico de lechugas, se inyecta una cantidad de nutrientes en un tiempo de 3,55 segundos, que corresponde a 60mililitros de la formula desarrollada para el sistema, se obtiene los datos que servirán para el determinar el modelo matemático del cultivo hidropónico.

**Tabla 7**

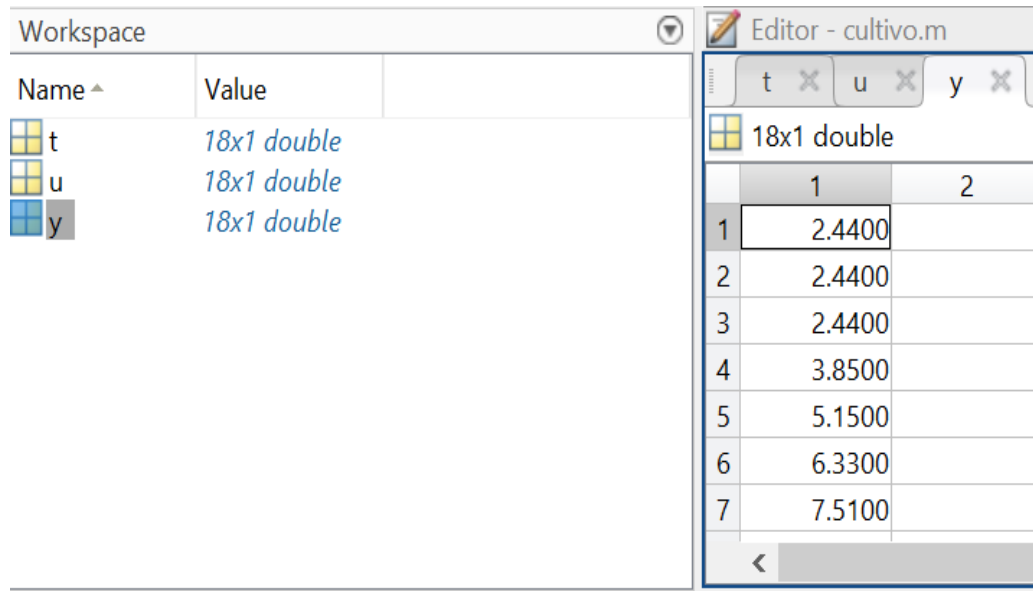
*Variación de la variable CE*

MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA				
NUM	TIEMPO(SEGUNDOS)	CANT	MEDICION (mS/cm)	MOTOR
0	0	0	2.44	0
1	3	60 ml	2.44	1
2	6	60 ml	2.44	1
3	9,55	60ml	3.85	1
4	13.1	60ml	5.15	1

NUM	TIEMPO(SEGUNDOS)	CANT	MEDICION (mS/cm)	MOTOR
5	16.65	60ml	6.33	1
6	20.2	60ml	7.51	1
7	23.75	60ml	8.79	1
8	27.3	60ml	10.05	1
9	30.85	60ml	11.29	1
10	34.4	60ml	12.44	1
11	37.95	60ml	13.65	1
12	41.5	60ml	14.82	1
13	45.05	60ml	16.02	1
14	48.6	60ml	17.20	1
15	50.96	60ml	18.00	0
16	52.15	60ml	18.40	0
17	55.7	60ml	19.60	0

### **Cargar los datos al Workspace**

Los datos se ingresan a MATLAB desde un archivo de datos que indica el comportamiento del proceso.

**Figura 19***Datos en el Workspace*

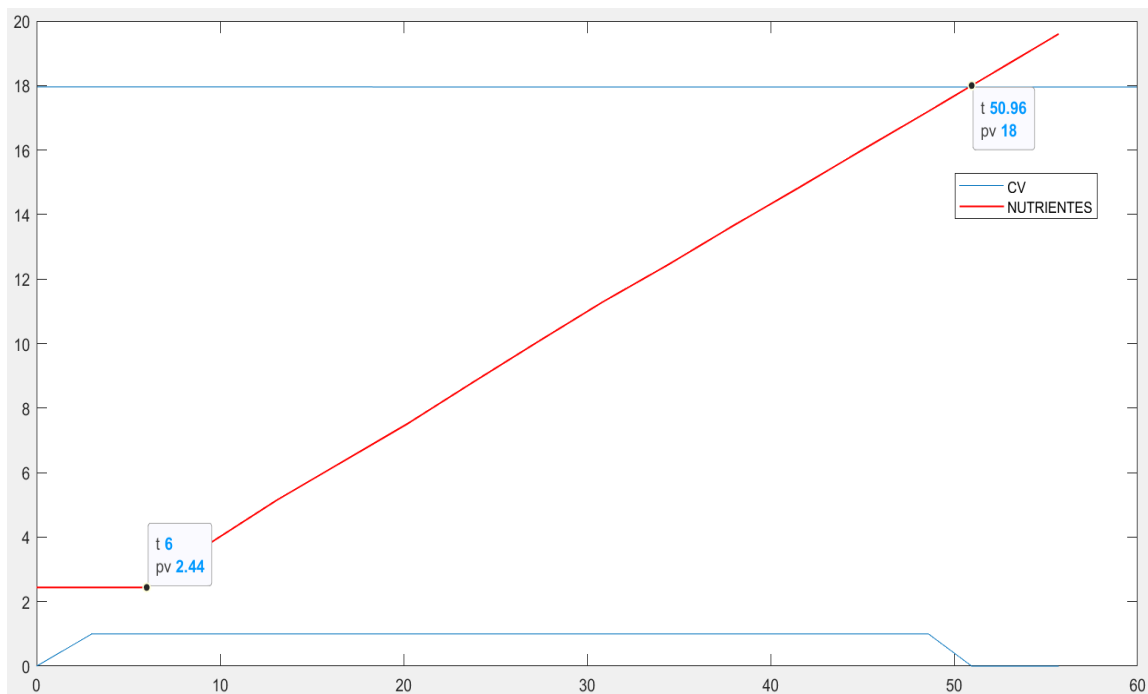
Se crea tres tipos de variables  $U(t)$  es la variable de actuación de la inyección de los nutrientes al reservorio del cultivo hidropónico,  $Y(t)$  es la respuesta del sistema,  $t$  es el tiempo en donde la respuesta empieza a tener valores distintos, los datos son tomados de una forma experimental, cuando la variable del proceso empieza a cambiarse va registrando para su almacenamiento.

### **Grafica de la planta $\text{plot}(t,u,t,y)$**

El comando  $\text{plot}(X, Y)$  crea una gráfica que fue desarrollada para líneas en 2D de los datos en  $Y$  vista a los valores que pertenecen a  $X$ . Si  $X$  o  $Y$  es un vector y debe tener dimensiones iguales para proceder a ser graficados los valores incursionados a los datos en el Workspace del software de Matlab.

**Figura 20**

Grafica de la planta  $plot(t,u,t,y)$



Los valores de los parámetros de la función de transferencia se obtienen utilizando las fórmulas del punto 2.2.6.2 y la curva presentada en la Figura 20, en donde:

$$m = \frac{18 - 2,44}{50,96 - 6}$$

$$m = \frac{15,56}{44,96}$$

$$m = 0,3461$$

$$K = \frac{0,3461}{18}$$

$$K = 0,01923$$

$$L = 6$$

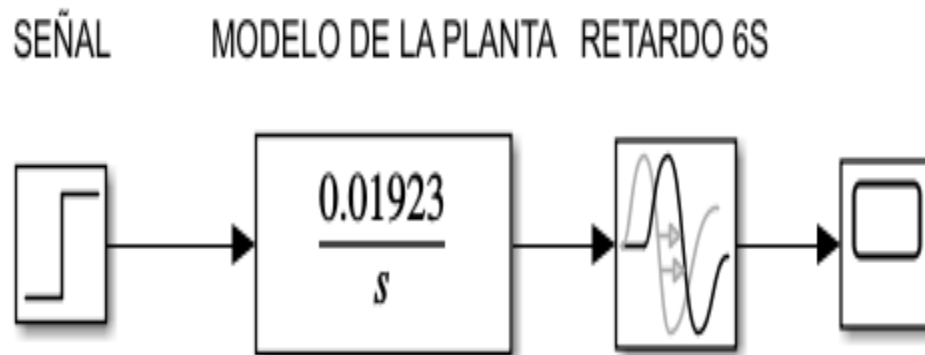
Al reemplazar los valores obtenidos en la ecuación de la función de transferencia se obtiene la siguiente fórmula:

$$G_{(s)} = \frac{0,01923}{s} e^{-6s} \quad (15)$$

La ecuación presentada es la función de transferencia que será utilizada para modelar en el cultivo hidropónico, el comportamiento de la planta en un entorno físico, permitirá encontrar las constantes del controlador PID.

### Figura 21

*Representación de la planta en simulink*



### Sintonía del controlador PID

Utilizando los parámetros mencionados en la ecuación (15), se realiza el cálculo de las constantes de sintonía para el controlador PID del cultivo hidropónico que se

utilizará para la inyección de los nutrientes al sistema de recirculación del agua, se ha considerado cuatro métodos de sintonía del controlador, para realizar un análisis comparativo y seleccionar la mejor sintonía que utilizara el controlador mencionado. en la Tabla 8 se muestran las constantes calculadas (las ecuaciones utilizadas para encontrar los valores de las constantes se pueden encontrar en la sección "Métodos de modificación para procesos integrantes").

**Tabla 8**

*Constantes de sintonía para el controlador del cultivo hidropónico*

<i>Método</i>	<i>Kc</i>	<i>Ti</i>	<i>Td</i>
<i>Ford</i>	10,4	12	2,2
<i>Astrom - Hagglund</i>	8,14	12	3
<i>Hay</i>	3,47	19,2	4,8
<i>Zou –Brigham</i> ( $\lambda = 3L$ )	4,95	142	2,78

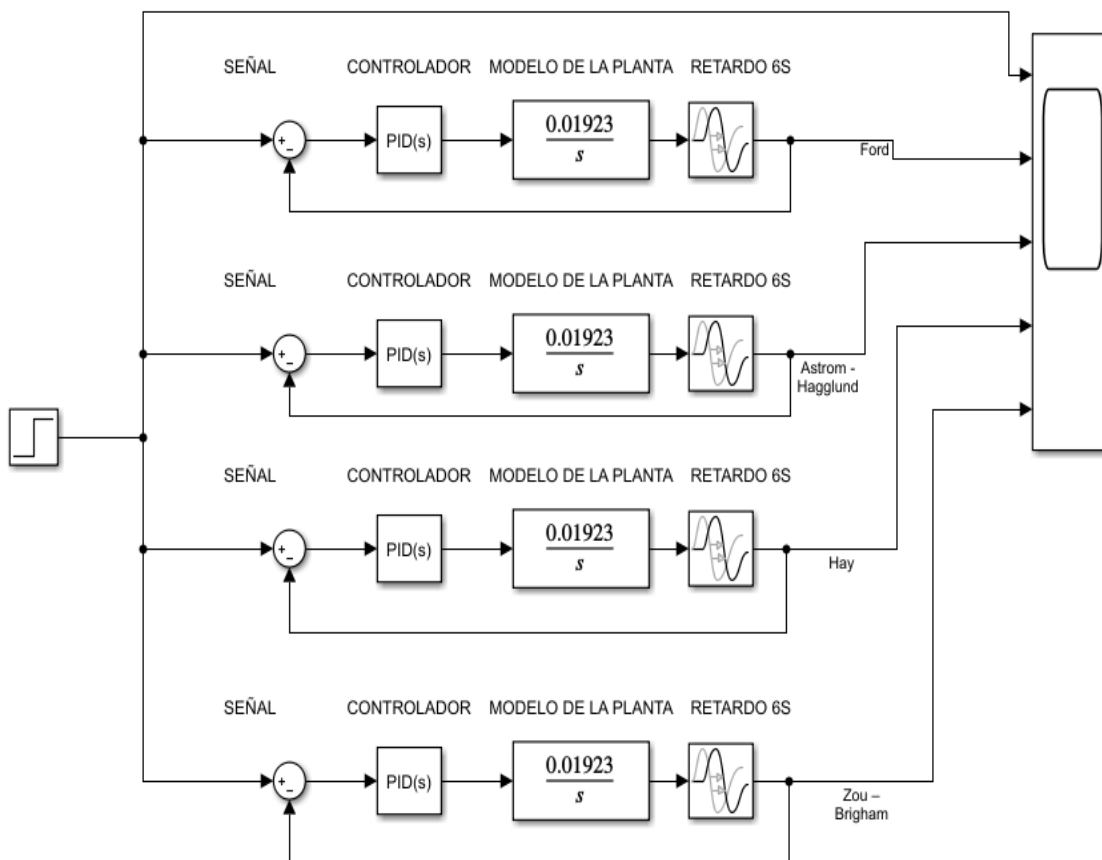
### **Simulación del controlador PID**

Para la simulación del modelo matemático del cultivo hidropónico se requiere la utilización de las herramientas del software de Simulink, el mismo que proporciona un entorno gráfico y amigable, el cual facilita el análisis de los sistemas de control para el análisis se tomara en cuenta los 4 métodos de sintonía del controlador.



Figura 22

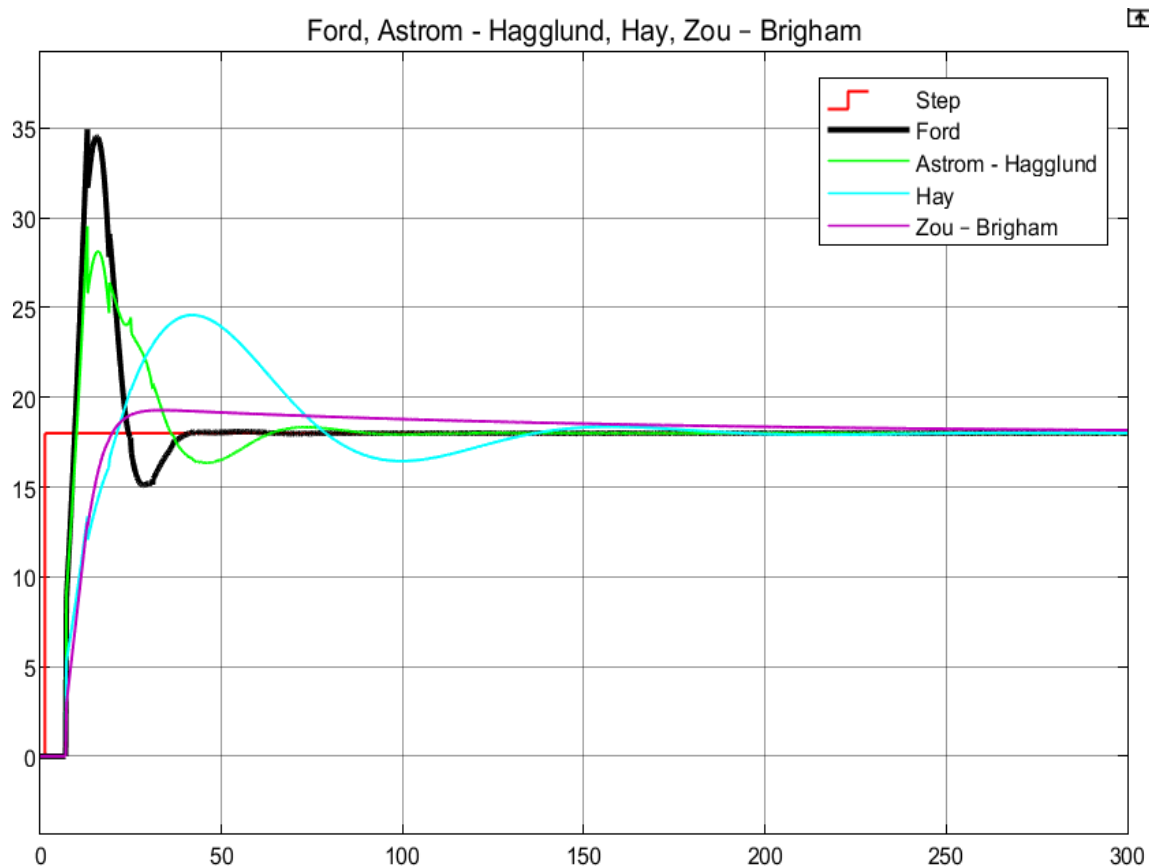
Simulación del controlador PID con varios métodos de sintonía



Para la obtención de las gráficas de los diferentes métodos de sintonía del controlador PID, se realiza la ejecución en simulink, en la figura 23 se obtiene los resultados al utilizar los 4 métodos de sintonía en la planta del cultivo hidropónico.

Figura 23

Resultados de los métodos de sintonía



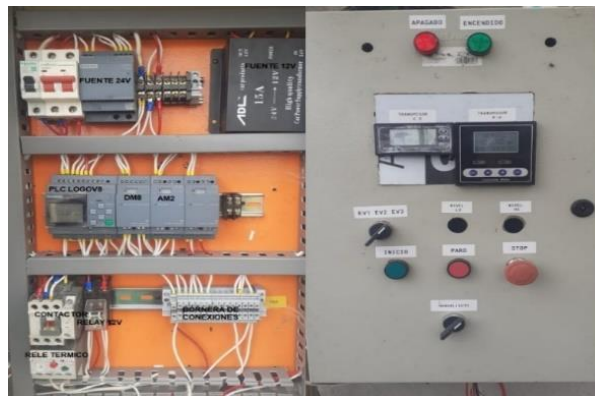
Dando como resultado que los valores más óptimos para la aplicación en el cultivo hidropónico es el método de Zou – Brigham donde se estabiliza en menos de los 250 segundos, y los demás tardan un poco más en estabilizarse, la variable a controlar es la conductividad eléctrica del sistema.

## Circuito eléctrico

El circuito eléctrico es aquel que se encarga de alimentar con energía a todos los dispositivos del sistema de control, en la siguiente tabla se muestra las entradas y salidas que tiene el sistema de control del cultivo hidropónico.

**Figura 24**

*Caja de control*



**Figura 25**

*Sensores de CE y pH*

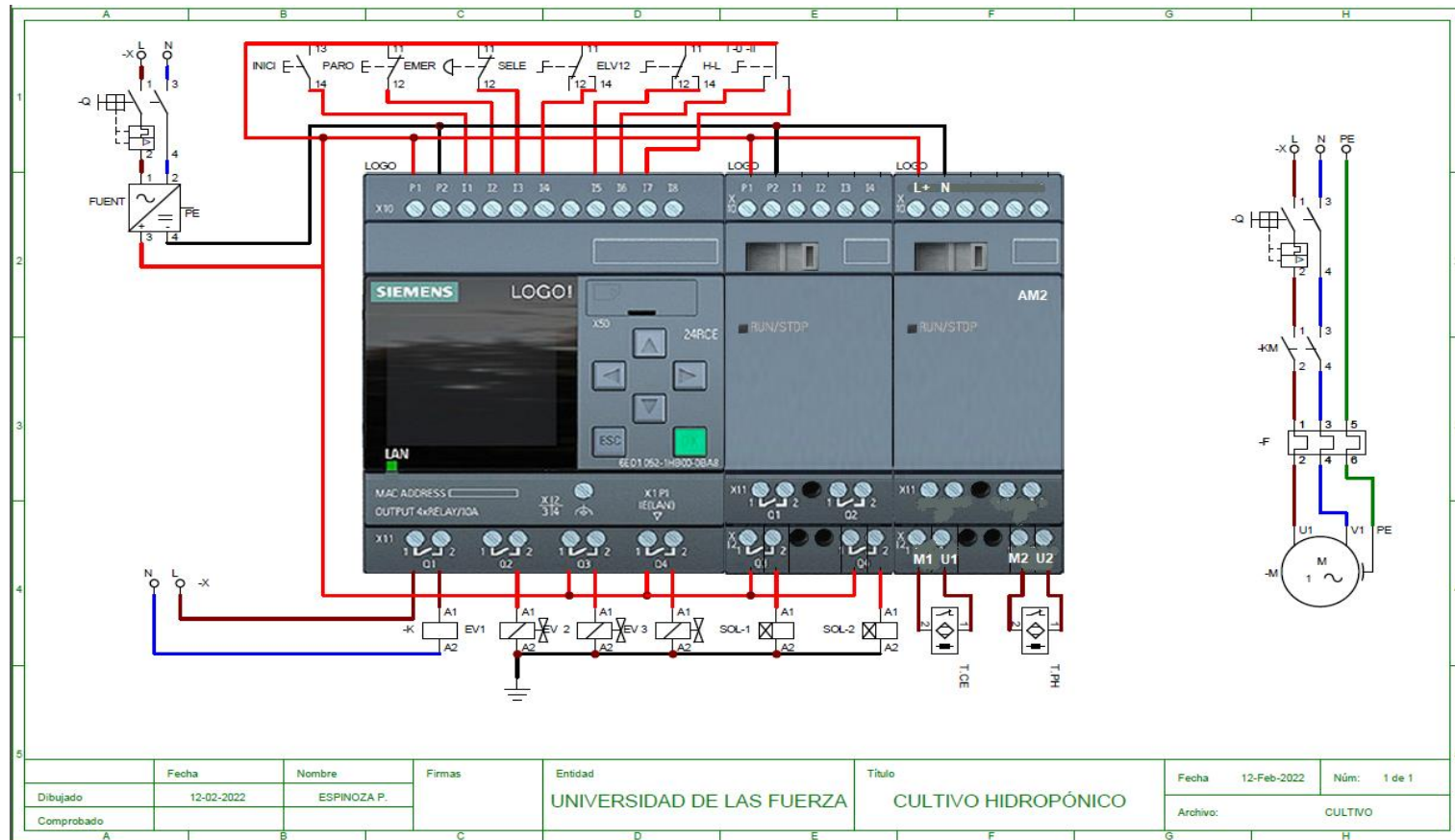


**Tabla 9***Conexión de los puertos del PLC logoV8*

ENTRADAS		SALIDAS		
NOMBRE	ENTRADA PLC	NOMBRE	SALIDAS PLC	DESCRIPCION
INICIO	I1	MOTOR	Q1	CIRCULACION DEL AGUA
STOP	I2	ELV1	Q2	OXIGENACIÓN
EMERGENCIA	I3	ELV2	Q3	CULTIVO
SELECTOR	I4	ELV3	Q4	NIVEL
ELV1/ELV2	I5	SOLUCION1	Q5	NUTRIENTES
CE	IA3	SOLUCION 2	Q6	ÓXIDO DE CALCIO
pH	IA4			
NH	I6			
NL	I7			

Figura 26

Circuito eléctrico



El autómata PLC logoV8, funciona con un voltaje de 24 V y todas las entradas del controlador con el mismo voltaje exceptuando las entradas analógicas del dispositivo ellos envían señal de 4 a 20mA, las salidas como es las electroválvulas, las bombas dosificadoras funcionan a 12V, el sistema de control tiene dos formas de funcionamiento Manual y Automática para la selección de ello se utiliza la entrada del Selector I4, en la parte automática el controlador recibe las señales de los transmisores de la conductividad eléctrica (CE) y del potencial hidrogeno (pH), que será utilizado para el controlador Proporcional Integral (PI) que se encuentra en el cultivo hidropónico, además se tiene un paro de emergencia en la entrada I3, para precautelar de algún tipo de problema, la salida Q1 se activa cada 20 minutos por dos minutos, la salida Q2 que corresponde a la oxigenación se activa por 30 segundos y la salida Q3 que distribuye los nutrientes al cultivo hidropónico se activa por 90 segundos.

Cuando se activa la señal del nivel bajo que corresponde a la entrada I7 se activa la salida Q4 hasta que el sensor reciba la señal del nivel alto entrada I6, las soluciones que son: Nutrientes y oxido de calcio, que necesita el cultivo hidropónico se activan las salidas Q5 y Q6, el control realiza el PLC logo V8 cuando recibe las señales analógicas en corriente por los transmisores de la conductividad eléctrica (CE) y del pH.

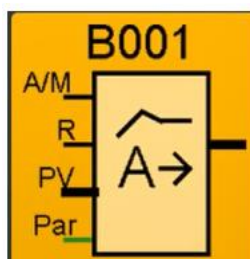
Cuando el selector se cambia a la parte manual se bloquea la parte del sistema de control PI, para el funcionamiento se presiona el botón inicio I1 que da la marcha del motor y mediante las electroválvulas Q2 y Q3 se manipula la dirección del agua ya sea para la oxigenación del agua o la circulación para el cultivo hidropónico y la electroválvula Q4 para completar el agua de la cisterna hasta que llegue a un nivel alto, el botón de paro I2 detiene el funcionamiento de la bomba de agua.

## Sistema de control PI

Una vez realizado la sintonía de las constantes del controlador, se determina la acción de control PI para la conductividad eléctrica y para el potencial Hidrogeno con los valores de  $K_c= 10,4$  y el  $T_i = 12$  que en el caso particular se opta por ubicar el valor de  $K_c=10$  y  $T_i=12$ , para la implementación se utiliza el software LOGO Soft Comfort V8.2 de Siemens, donde la configuración del controlador se realiza en el bloque regulador PI que se encuentra en el entorno de programación.

### Figura 27

*Bloque del Regulador PI*



El bloque del regulador PI tiene un enable que es A/M para el controlador actúe, en la entrada PV en donde se ingresa la señal del transmisor de las variables a controlar.

Al ingresar al bloque se encuentra los parámetros para calibrar el controlador donde se ubica el valor de las constantes  $K_c$  y  $T_i$ .

Figura 28

Calibrar los parámetros del controlador PI

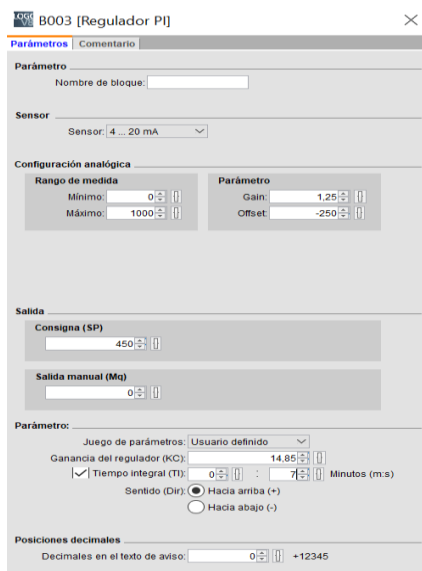
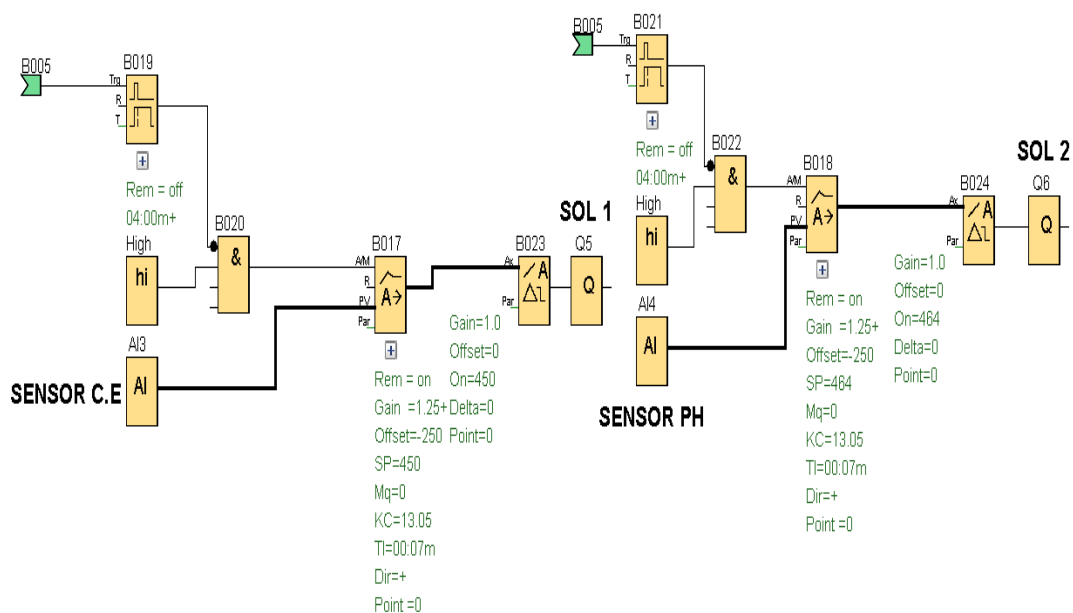


Figura 29

Sistema de control PI

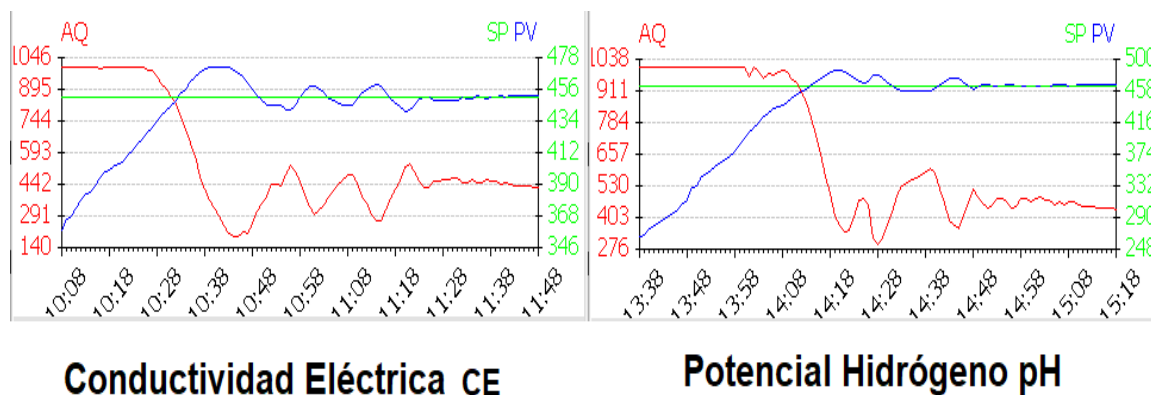




La simulación del funcionamiento del controlador PI, se realiza cuando se varía el valor de las entradas analógicas IA3 y IA4 que son la conductividad eléctrica y el pH, para ello se debe tomar en cuenta lo siguiente: el valor de Setpoint de la CE corresponde al valor analógico de 450 que es 1,8uS/cm es el valor máximo que la variable debe llegar, el valor del Setpoint del pH corresponde al valor analógico de 464 que es 6,5pH del agua.

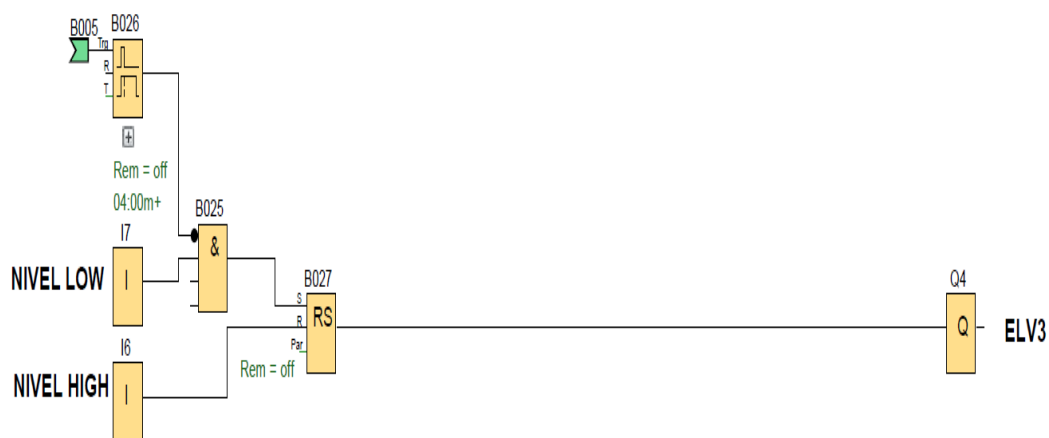
**Figura 30**

*Graficas del proceso*



### Control de nivel

Una de las características técnicas del desarrollo de la planta de lechuga es la utilización de agua para el crecimiento, así que el control de nivel del sistema es un control On – Off para la reposición del agua que es consumida por la planta, permitiendo así tener a un nivel prudente el estanque.

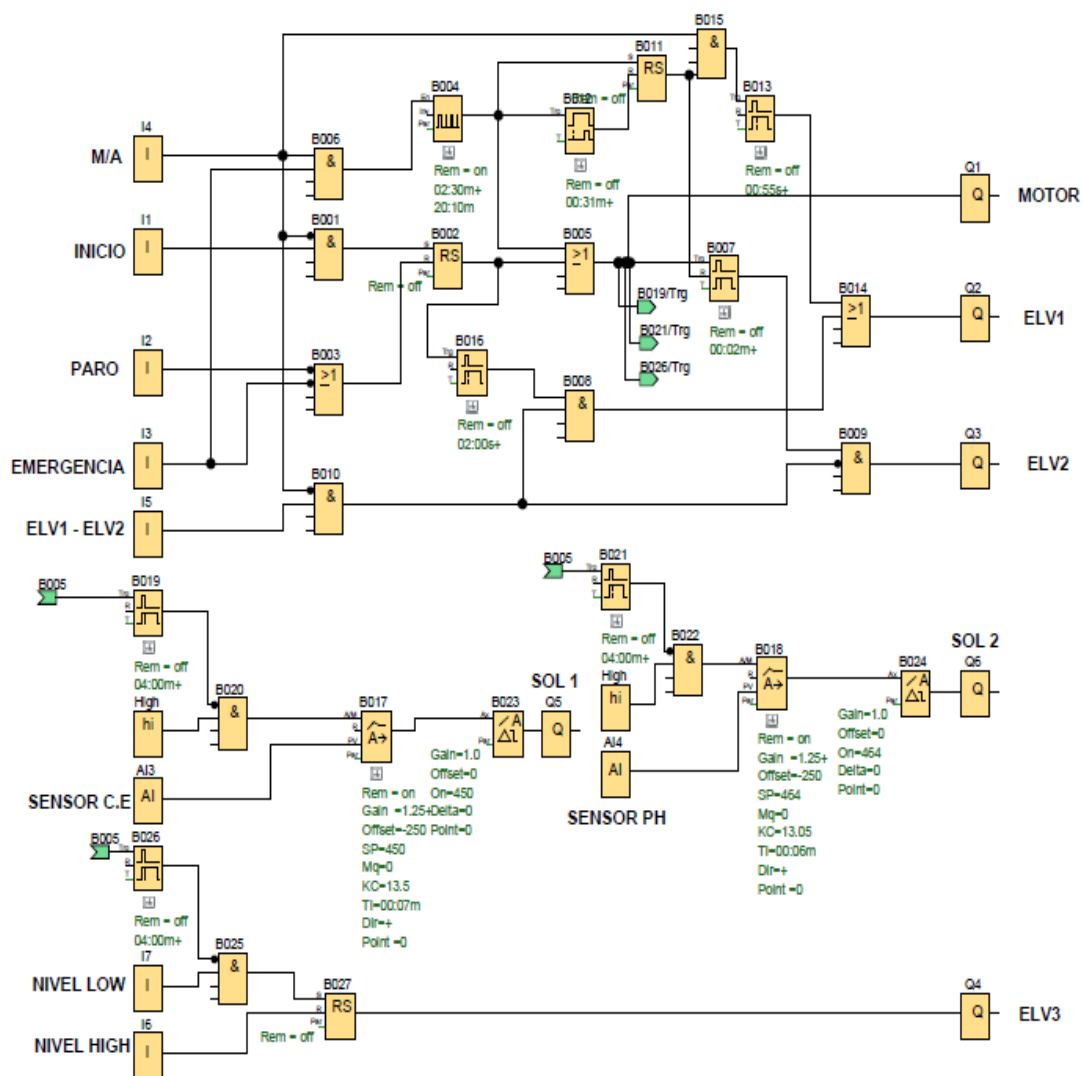
**Figura 31***Control de nivel***Mando manual y automático**

El mando manual – automático se realiza para que en modo automático, controle el sistema con las mediciones de los sensores de la conductividad eléctrica y del pH, además permita que la acción de control intervenga en el proceso cuando lo requiera, así, tener siempre una estabilidad de las variables del proceso, para que no sufra ningún problema el desarrollo de la panta de lechuga. El modo manual se utiliza para tener una autonomía el operador, por lo regular se utiliza para un mantenimiento del estanque y limpieza de las tuberías que se realiza cada vez que cosecha una planta esto es para mitigar el crecimiento de bacteria y hongos que puede ser perjudicial para el buen desenvolvimiento de la planta.



Figura 33

Programa del cultivo hidropónico



## Capítulo iv

### Resultados

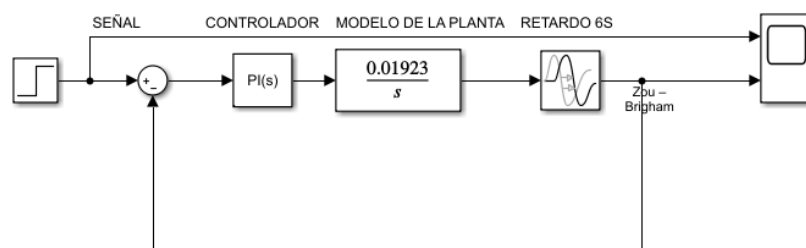
Se realizaron pruebas de funcionamiento para determinar la funcionalidad del sistema, en modo automático-manual, el funcionamiento de sus instrumentos industriales como son los transmisores de la conductividad eléctrica y del pH, también se realizó el montaje de los elementos de control como es el controlador lógico programable logo V8 versión 8.2.

#### Sistema de control PI

Después de crear los modelos de control con retroalimentación se asigna los valores de las constantes de sintonía que corresponde al método de sintonía Zou – Brigham, el autómeta Logo V8 tiene el controlador PI, el cual será utilizado para la implementación del cultivo hidropónico, las constantes encontradas para el controlador se utilizarán para determinar la conductividad eléctrica y para el potencial hidrogeno, el sistema de control se muestra a continuación:

**Figura 34**

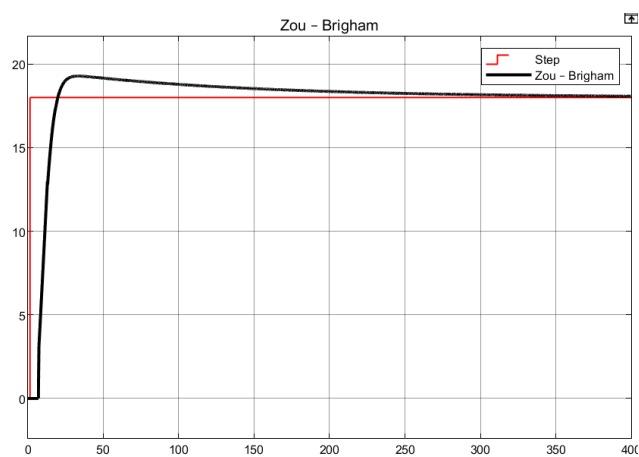
*Sistema de control PI*



Al aplicar el método de sintonía Zou – Brigham para el controlador PI cuando el proceso industrial es integrante, el mismo se empieza a estabilizar desde los 250 segundos el sistema.

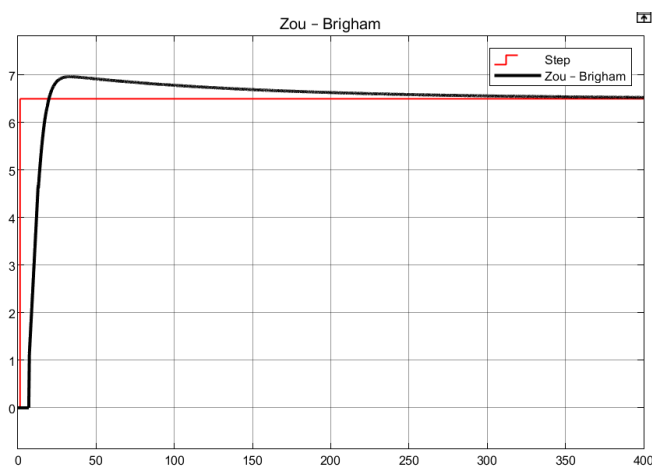
**Figura 35**

*Simulación del Controlador PI, para la CE*



**Figura 36**

*Simulación del Controlador PI para el pH*

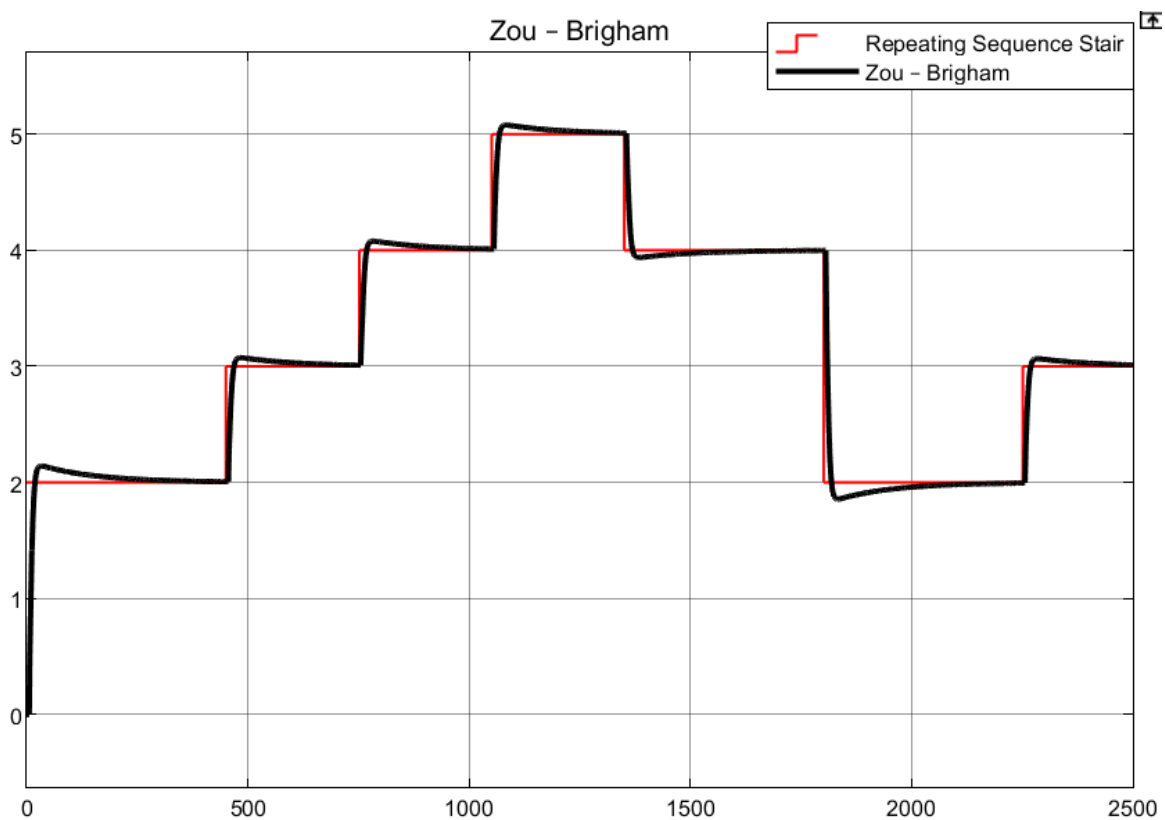


Tomando en cuenta las respuestas de los controladores, para la implementación del sistema de control para el cultivo hidropónico se puede optar por cualquier controlador debido a que el proceso es de acción lenta no requiere mayor precisión en el mismo, para la inyección de los nutrientes del cultivo se opta por el controlador PI y para la inyección del óxido de calcio para el control del pH, se opta por el controlador PI, debido a que el PLC logo V8 tiene un bloque para esta acción de control.

Para las pruebas del controlador se somete a una serie de variaciones en la señal de entrada, que se presenta en la siguiente figura.

**Figura 37**

*Simulación del controlador PI con variación se señal*

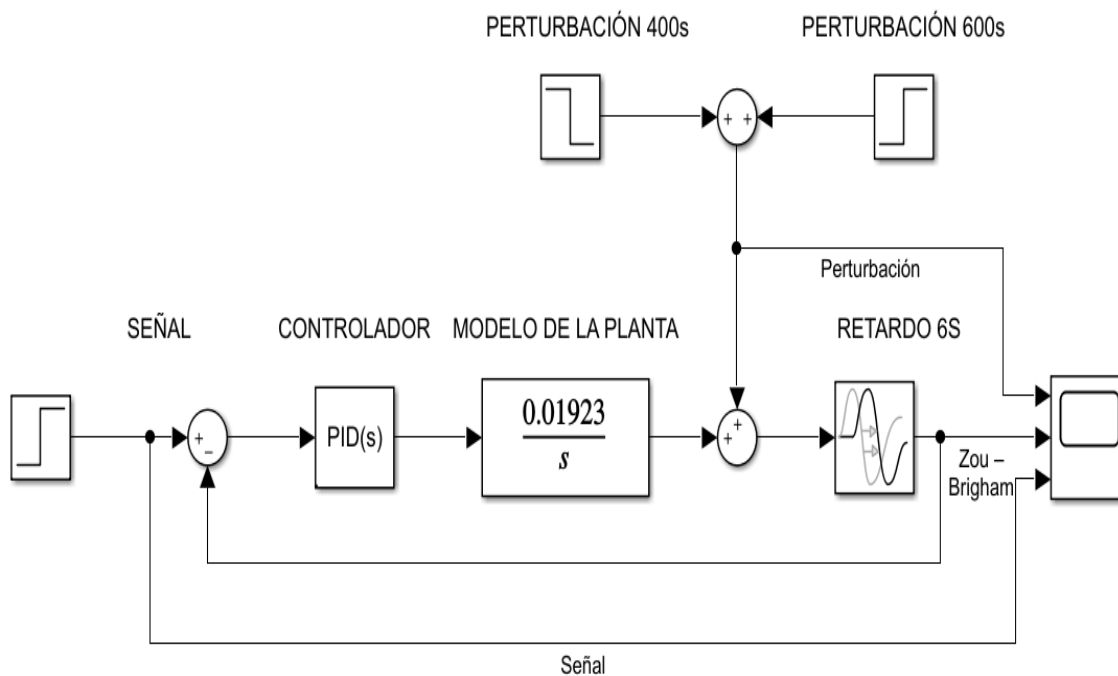


### Sistema de control PI con perturbación

En el sistema de control del cultivo hidropónico se puede someter a perturbaciones al momento de introducir al sistema agua sin nutrientes, el controlador debe actuar el mismo instante, pero por efecto de las tuberías existe un retardo que es similar al encontrado en el modelo matemático.

**Figura 38**

*Sistema de control con perturbación*



Se presenta la gráfica del sistema de control con perturbación que permite al controlador PI interactúe al momento que exista una variación presentada en la variable controlada.



Figura 39

Graficas sistema de control con perturbación

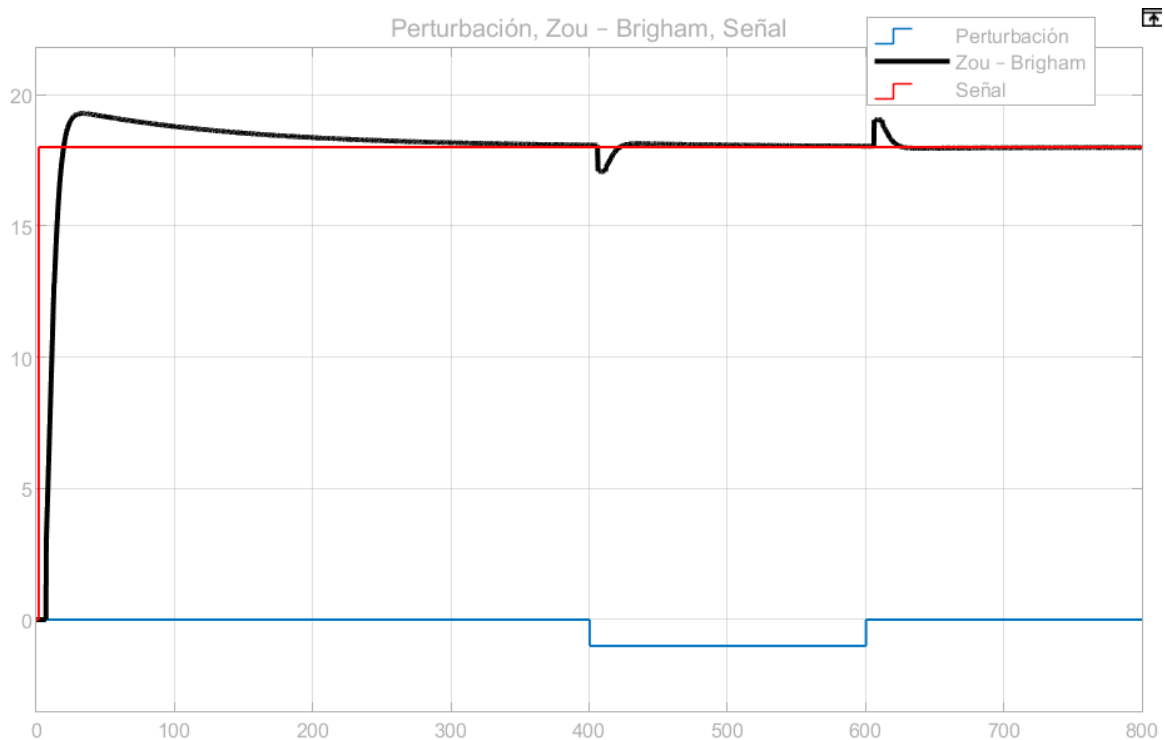


Tabla 10

Parámetros existentes en la curva de salida

<b>Método</b>	<b>Sobre impulso (%)</b>	<b>Asentamiento(seg)</b>
<b>Ford</b>	94,44	25
<b>Astrom - Hagglund</b>	61,11	35
<b>Hay</b>	36,11	70
<b>Zou -Brigham (<math>\lambda = 3L</math>)</b>	6,94	35

## Comprobación de la hipótesis

En la comprobación de resultados se tiene el desarrollo de cultivo de la planta de lechuga tipo crespa desde su plantación hasta la cosecha en todas estas etapas de crecimiento se utiliza la misma fórmula química, al inicio de su plantación se lo realiza en vasos térmicos de 4 onzas con un orificio en la mitad para que se sostenga la planta en la tubería, en un promedio de 9 semanas las lechugas se encuentran listas para su cosecha como se indica en la siguiente figura.

### Figura 40

*Plantación de lechugas*

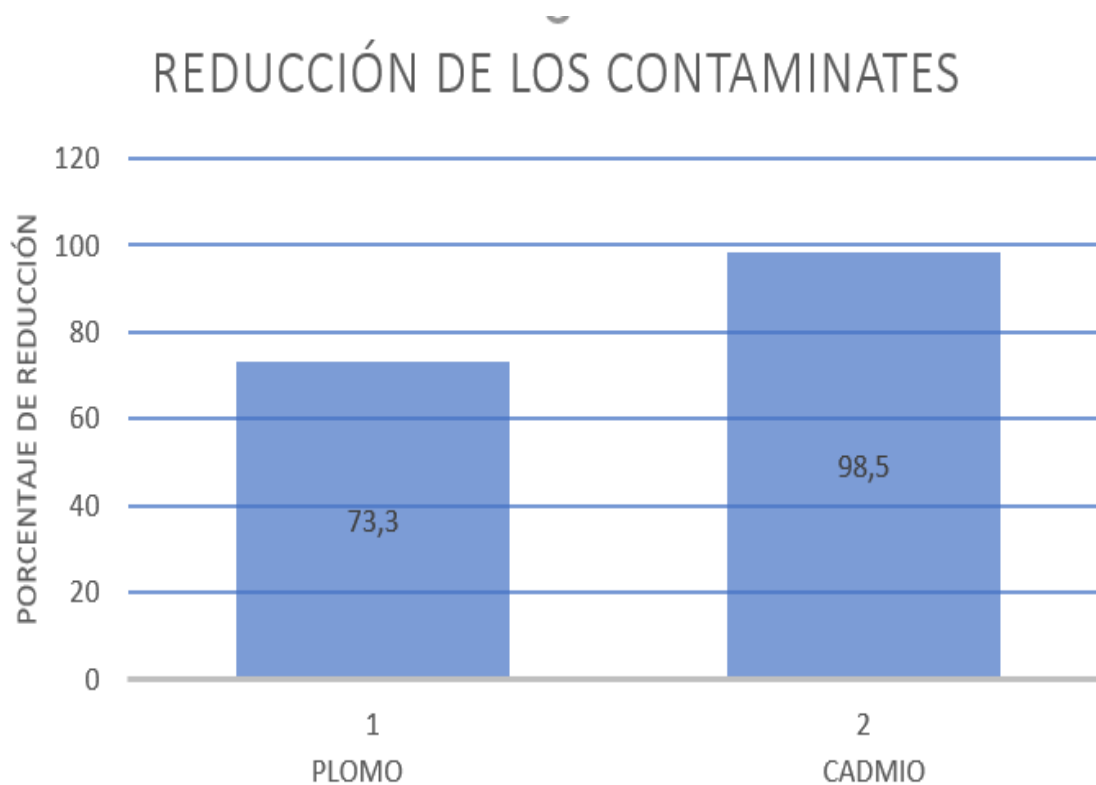


Se realizó los análisis químicos, para determinar los metales pesados como en este caso particular es el Plomo y el Cadmio, se efectuó mediante el método AOAC 999.11

modificado con uso del espectrofotómetro de absorción atómica y a temperaturas ambiente que no altera los resultados obtenidos, cuyos resultados fueron comparados con el CODEX (1995). Los resultados arrojaron una mínima concentración de dichos metales en las plantas de lechuga tipo cresa y de repollo, ya que ninguno superó el nivel máximo permitido por el CODEX, los valores permitidos para el Plomo son de 0,3 mg/kg y para el cadmio es 0,2 mg/kg. En el análisis del laboratorio postcosecha menciona que para el Plomo son de 0,08 mg/kg y para el cadmio es 0,003 mg/kg, que se reduce un 73.3 % en Plomo y un 98,5 en Cadmio, que se representa en la siguiente figura:

**Figura 41**

*Resultados*



## Capítulo v

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

- Mediante la información procesada en fuentes bibliográficas se considera que para el desarrollo de la planta de lechuga se necesita los macro nutrientes como: Fosforo, Potasio y Nitrógeno y también micronutrientes como: Hierro, Magnesio, Zinc entre otros.
- La conductividad eléctrica cumple un rol muy importante para el crecimiento de la planta, porque es el alimento que recibe la lechuga para su desarrollo, esto es la cantidad de sales disueltas en el reservorio y el potencial de hidrogeno permite la absorción de los minerales disueltas en el agua.
- El proceso del cultivo hidropónico es de acción lenta y se puede implementar sistemas de control de lazo cerrado, Proporcional Integral y Proporcional Integral Derivativo como los más acordes al proceso de control de las variables del proceso.
- Una vez obtenido el modelo matemático de primer orden más tiempo muerto del cultivo hidropónico y para encontrar las constantes del controlador PI se aplica los 4 métodos de sintonía, se concluye que es muy efectivo para procesos continuos como en los cultivos hidropónicos de lechugas.
- Mediante los análisis realizados a las plantas de lechugas de tipo crespa y de repollos en el laboratorio CENTROCESAL, de la ciudad de Quito, menciona que

la concentración de plomo es de un 26,7% y del cadmio es de 1,5%, valores inferiores establecidas por un conjunto de normas internacionales de los alimentos (CODEX),

### **Recomendaciones**

- Utilizar un sólo tipo de nutrientes durante la cosecha porque esto puede provocar un desbalanceo nutricional que necesita para el desarrollo en la planta de lechuga.
- Al momento de plantar, realizar una desinfección a la raíz de la planta para que no produzca hongos y pueda dañar el cultivo hidropónico.
- Realizar una limpieza de la tubería, conductos de drenaje, estanque y de los sensores de la conductividad eléctrica y del pH, con algún tipo de desinfectante como puede ser agua con cloro.
- No cambiar las bombas dosificadoras a 12v, esto cambiaría el modelo de la planta y por ende las constantes de sintonía que son utilizados en el controlador lógico programable.

### Bibliografía

- Beltrano, J., & O. Gimenez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://elibro.net/es/lc/itsoriente/titulos/66458>  
*Controlador-de-pH*. (s. f.).  
[https://ae01.alicdn.com/kf/HTB18IF2XZrHK1JjSspdq6xNFpXaU/Medidor-de-pH-Industrial-en-l-nea-transmisor-controlador-de-pH-Analizador-de-Monitor-con-Sensor.jpg\\_Q90.jpg\\_.webp](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB18IF2XZrHK1JjSspdq6xNFpXaU/Medidor-de-pH-Industrial-en-l-nea-transmisor-controlador-de-pH-Analizador-de-Monitor-con-Sensor.jpg_Q90.jpg_.webp)  
*Control-Meter-EC510*. (s. f.).  
<https://ae01.alicdn.com/kf/Hd160ef4b8ba34ce495fcd855de19dc10A/EC-451S-EC-Controller-Conductivity-Control-Meter-EC510-Controller-Water-Quality-Monitor-Checker-Detector-0-20.jpg>
- Coughran, M. (2021). *The Universal Method for PID Controllers in Process Control*.
- Creus Sole, A. (2008). *Simulación y control de procesos por ordenador (2a. Ed.)*. Marcombo. <https://elibro.net/es/lc/itsoriente/titulos/45916>
- Gilda Carrasco, Ph. D., & Juan Izquierdo, Ph. D. (1996). *LA EMPRESA HIDROPÓNICA DE MEDIANA ESCALA: LA TECNICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA RECIRCULANTE («NFT»)* (Vol. 1). Universidad de Talca.
- Jacques-Hernández, C., & Hernández, J. L. (2005). *Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT)*. 3, 11-16.
- JAPON QUINTERO, J. (s. f.-a). *Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura*. 20.000, 20.
- JAPON QUINTERO, J. (s. f.-b). *Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura*. [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1977\\_10.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1977_10.pdf)

*Lechuga-crespa*. (s. f.). [https://countryfruit.uy/1674-large\\_default/lechuga-crespa-organica-x-3un.jpg](https://countryfruit.uy/1674-large_default/lechuga-crespa-organica-x-3un.jpg)

Llanos Peada, P. H. (2001). *La Solución Nutritiva, Nutrientes Comerciales, Formulas completas*.

[www.walcoagro.com](http://www.walcoagro.com)<http://www.drcalderonlabs.com/Hidropónicos/Soluciones1.html>

Moreno Zaragoza, F., & Zubiaurre Lusa, J. (2014). *Automatismos y cuadros eléctricos (2a. Ed.)*. Cano Pina. <https://elibro.net/es/lc/itsoriente/titulos/43095>

Neco García, R. P. (2013). *Apuntes de sistemas de control*. ECU.

<https://elibro.net/es/lc/itsoriente/titulos/62263>

O. E. Camacho, R. D. Rojas, W. M. Garcia, & A. Alvarez. (1998). Sliding mode control: A robust approach to integrating systems with dead time. *Proceedings of the 1998 Second IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems. ICCDCS 98. On the 70th Anniversary of the MOSFET and 50th of the BJT. (Cat. No.98TH8350)*, 401-406.

<https://doi.org/10.1109/ICCDCS.1998.705872>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna (Quinta)*. PEARSON EDUCACIÓN.

Rivera Barrero, C. A., Muñoz Hernández, J. A., & Muñoz Hernández, L. A. (2014).

*Control automático I: estrategias de control clásico*. Sello Editorial Universidad del Tolima. <https://elibro.net/es/lc/itsoriente/titulos/71028>

Siti Mashumah, Rivai, M., & Irfansyah, A. N. (2018). Nutrient Film Technique based Hydroponic System Using Fuzzy Logic Control. *2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 387-390.

<https://doi.org/10.1109/ISITIA.2018.8711201>

Villajulca, J. C. (2019, febrero 21). *Procesos Auto-regulatorios (self-regulating): SOLO proporcional + integral*. <https://instrumentacionycontrol.net/procesos-auto-regulatorios-self-regulating-solo-proporcional-integral/>



# ANEXOS