



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

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,**  
**AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**  
**TÍTULO DE INGENIERA EN ELECTRÓNICA,**  
**AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA**  
**AUTOMÁTICO DE CONTROL PARA LA ESTERILIZADORA**  
**EN SECO MARCA MEMMERT DE LA CLÍNICA MATERNO-**  
**INFANTIL SANTA BÁRBARA**

**AUTORA: ANDRADE GARCÍA VERÓNICA JOHANNA**

**DIRECTOR: ING. GORDILLO, RODOLFO**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA EN  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Ing. Rodolfo Gordillo

Certifico que el trabajo de titulación “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL PARA LA ESTERILIZADORA EN SECO MARCA MEMMERT DE LA CLÍNICA MATERNO-INFANTIL SANTA BÁRBARA”, realizado por la señorita, VERÓNICA JOHANNA ANDRADE GARCÍA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita Verónica Johanna Andrade García para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Agosto 2016

Atentamente,

---

Ing. Rodolfo Gordillo

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,**  
**AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, VERÓNICA JOHANNA ANDRADE GARCÍA, con C.I. 171868947-2, declaro que este trabajo de titulación , “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL PARA LA ESTERILIZADORA EN SECO MARCA MEMMERT DE LA CLÍNICA MATERNO-INFANTIL SANTA BÁRBARA**”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando todos los derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que consta al pie de las pagina correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la investigación mencionada.

Sangolquí, Agosto 2016

VERÓNICA JOHANNA ANDRADE GARCÍA

C.I. 171868947-2



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,**  
**AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, VERÓNICA JOHANNA ANDRADE GARCÍA, autorizo a la Universidad De Las Fuerzas Armadas-ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROL PARA LA ESTERILIZADORA EN SECO MARCA MEMMERT DE LA CLÍNICA MATERNO-INFANTIL SANTA BÁRBARA”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Agosto 2016

VERÓNICA JOHANNA ANDRADE GARCÍA

C.I. 171868947-2

## **DEDICATORIA**

A todos aquellas personas que tiene un sueño y van tras de él.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios**

Por colocar en mi vida las pruebas necesarias para permitirme llegar al lugar donde estoy llena de vida y salud en compañía de las personas que amo.

### **A mis padres**

Alberto y Ana por los cimientos que establecieron en mí desde pequeña, para ser la persona que soy e impulsarme a llegar tan alto como yo quiera y creer en mí siempre.

### **A mis hermanos**

Geovanny y Carlos, porque me han apoyado en los momentos oportunos y saber que la distancia no es un obstáculo para mantenernos unidos.

### **A mi esposo e hijas**

A Ricardo por amarme en mis peores momentos, por esperar pacientemente que concluya mi carrera y enseñarme que no importa que tan dura sea la caída, siempre tengo dos brazos fuertes para llevarme y seguir de pie. A Danna y Leonela quienes son la fuente de energía e inspiración para ser mejor cada día.

### **A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE**

Por abrirme las puertas y descubrir un mundo diferente, en el que yo puedo ser una herramienta de aporte, para el progreso de mi hermoso país. Por todos los momentos compartidos y las amistades inolvidables encontradas aquí.

### **A mis maestros y maestras**

Por brindarme su amistad y su apoyo incondicional, por estar conmigo en todo momento y enseñarme que el conocimiento no tiene límites.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CARÁTULA</b> .....	i
<b>N</b> .....	ii
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	iii
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xi
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>CAPÍTULO I</b> .....	14
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO</b> .....	14
<b>1.2. PROCESO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA</b> .....	14
<b>1.3. ANTECEDENTES</b> .....	15
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA</b> .....	15
<b>1.5. ALCANCE</b> .....	16
<b>1.6. OBJETIVOS</b> .....	17
<b>1.6.1. Objetivo General</b> .....	17
<b>1.6.2. Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>CAPÍTULO II</b> .....	18
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	18
<b>2.1. Termodinámica</b> .....	18
<b>2.1.2. Propiedades físicas</b> .....	18
<b>2.2. Instrumentos de medición</b> .....	20
<b>2.3. Análisis de tipo de sensores</b> .....	20
<b>2.3.1. Termopar</b> .....	21
<b>2.4. Modelamiento del sistema térmico</b> .....	24

2.4.1.	Introducción.....	24
2.4.2.	Variables internas del sistema térmico .....	25
2.5.	Identificación de la planta.....	26
2.5.4.	Controlador Proporcional Integrativo PI.....	30
2.5.5.	Reglas de Ziegler-Nichols.....	31
2.5.7.	Sistemas con retardo de transporte.....	36
2.5.8.	Controlador digital.....	37
2.5.9.	Saturación.....	40
2.5.10.	Retardos .....	40
2.6.	Microcontrolador Arduino Uno .....	41
2.6.1.	Convertidor análogo – digital .....	43
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>45</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN .....</b>		<b>45</b>
3.1.	Previo a la implementación.....	45
3.2.	Características y componentes de la planta.....	47
3.2.1.	Diseño del actuador .....	48
3.2.2.	Características y acondicionamiento de señal de los sensores.....	50
3.2.2.1.	Termopar Tipo K .....	50
3.2.3.	Acondicionamiento de señal para termopar tipo K con AD595.....	51
3.2.4.	Fuente De Tensión Eléctrica .....	54
3.2.5.	Circuito para LCD .....	55
3.2.6.	Circuito Final.....	56
3.4.	Diseño del controlador .....	58
3.4.1.	Descripción de la planta .....	58
3.4.2.	Obtención del modelo matemático .....	59
3.4.3.	Caracterización del proceso.....	59
3.4.4.	Adquisición de datos .....	59
3.4.5.	Obtención experimental del modelo matemático de la planta .....	63
3.5.	Sintonización del controlador.....	66
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>76</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>		<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>84</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1 Esquema De Control.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2 Ejemplo de tipos de transferencia de calor .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3 Definición de los tipos de transferencia de calor .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 Partes de un termopar .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 5 Efecto termoeléctrico=efecto de Seebeck .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 6 (a) Diagrama de bloques de un Sistema de Primer Orden .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7 Respuesta escalón para un sistema de primer orden .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 8 Curva de respuesta escalón unitario, sobrepaso máximo de 25%.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 9 Respuesta escalón unitario de una planta .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 10 Curva de reacción con, forma de S .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11 Curva de reacción del proceso .....</b>	<b>34</b>
<b>Figuran 12 Parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 13 Sistema de control analógico .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 14 Sistema de control digital Equivalente .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 15 Diseño paralelo de controlador PID .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 16 Saturación de un transistor que actúa como un interruptor .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 17 Respuesta de la planta ante una entrada escalón .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 18 Estructura interna de un Arduino Uno .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 19 Ciclo manual y Automático Obsoleto .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 20 Visualizador y temporizador deteriorado .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 21 Fugas por selle de puerta deformado .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 22 Daño del material en el proceso de esterilización .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 23 Diagrama de bloques del sistema de control de la planta .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 24 Estructura de un triac .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 25 Circuito De Disparo .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 26 Esquema de Bloques AD595.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 27 Comportamiento de voltaje de salida del AD595.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 28 Circuito de acondicionamiento de termopar con Ad595.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 29 Fuente de alimentación eléctrica.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 30 Circuito para LCD.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 31 Tarjeta de control .....</b>	<b>56</b>

<b>Figura 32</b> Panel de control.....	57
<b>Figura 33</b> Pruebas de funcionamiento .....	57
<b>Figura 34</b> Instalación final del panel de control.....	58
<b>Figura 35</b> Programa con el cual se lee los datos en puerto analógico.....	60
<b>Figura 36</b> Programa con el cual se realiza la comunicación Arduino Matlab .....	61
<b>Figura 37</b> Curva de reacción del proceso .....	63
<b>Figura 38</b> Parámetros de la planta mediante el método de Ziegler-Nichols .....	64
<b>Figura 39</b> Algoritmo para la Gráfica de respuesta de la planta con entrada escalón ....	67
<b>Figura 40</b> Curva de respuesta de la de la planta ante un escalón .....	67
<b>Figura 41</b> Función de transferencia derivada .....	68
<b>Figura 42</b> Recta tangente al punto de inflexión en la curva de respuesta .....	69
<b>Figura 43</b> Valor del tiempo muerto $L=0.05$ .....	69
<b>Figura 44</b> Diagrama a bloques del sistema de una planta con un control PI.....	70
<b>Figura 45</b> Respuesta de la planta ente una entrada escalón con PI teórico .....	71
<b>Figura 46</b> Respuesta de la planta ente una entrada escalón con PI ajustado .....	72
<b>Figura 47</b> Respuesta de la planta, tiempo discreto $t_s=4.52$ .....	74
<b>Figura 48</b> Estructura de la función <code>map()</code> .....	75
<b>Figura 49</b> Algoritmo de programación de PI digital en Arduino Uno .....	75
<b>Figura 50</b> Diagrama de Root Locus de la planta con control PI.....	76
<b>Figura 51</b> Respuesta de la planta ante una entrada escalón con PI teórico .....	78
<b>Figura 52</b> Respuesta de la planta con controlador PI compensado.....	78
<b>Figura 53</b> Respuesta de la planta al control digital .....	79
<b>Figura 54</b> Respuesta de la planta a $60^{\circ}\text{C}$ .....	80
<b>Figura 55</b> Respuesta de la planta a $140^{\circ}\text{C}$ .....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1 Tipos de termopares</b> .....	23
<b>Tabla 2 Uso de termopares tipo J y tipo K</b> .....	24
<b>Tabla 3 Relación matemática del sistema térmico</b> .....	25
<b>Tabla 4 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols (Primer método)</b> .....	33
<b>Tabla 5 Características Arduino UNO</b> .....	43
<b>Tabla 6 Características de MOC3021</b> .....	50
<b>Tabla 7 Composición termopar tipo K</b> .....	50
<b>Tabla 8 Características termopar tipo K</b> .....	51
<b>Tabla 9 Datos dados por la hoja técnica AD595</b> .....	52
<b>Tabla 10 Voltaje de operación circuito integrado AD595</b> .....	53
<b>Tabla 11 Datos experimentales de la planta frente a una entrada escalón</b> .....	62
<b>Tabla 12 Datos de la curva de reacción, ejes de referencia</b> .....	63
<b>Tabla 13 Calculo de L y T</b> .....	68
<b>Tabla 14 Calculo de las constantes para diseño de controlador PI</b> .....	70
<b>Tabla 15 Valores de K, Ganancia de la planta</b> .....	77
<b>Tabla 16 Datos de la Simulación</b> .....	80
<b>Tabla 17 Datos de la Simulación</b> .....	81

## **RESUMEN**

Este proyecto de titulación tiene como finalidad, determinar la ingeniería del sistema de control automático para una esterilizadora de calor seco. Para la ingeniería del hardware se implementó de un Módulo Actuador, que se conformó de un circuito de potencia y un circuito de disparo. Cuya función es el control de la cantidad de potencia suministrada a la resistencia de cerámica que posee la Esterilizadora, haciendo un recorte de la onda de voltaje, utilizando un triac. También se desarrolló un modelo matemático ajustado a la dinámica del sistema y en base a los datos recolectados, con el apoyo de las herramientas del software de Matlab, se llevó a cabo las pruebas en tiempo real, se obtuvo la función de transferencia de la planta, para lograr el dimensionamiento de los parámetros del controlador PI. Dichos parámetros fueron acoplados en la librería PID de Arduino que en conjunto con un ajuste por prueba error, se obtuvo un desempeño óptimo para el equipo.

### **Palabras claves**

**CIRCUITO DE POTENCIA**

**CIRCUITO DE CONTROL**

**CONTROL PI**

**ARDUINO**

## **ABSTRACT**

This titling project aims to determine the engineering of automatic control system for a Dry Heat Sterilizer. For hardware engineering was implemented in a Maker Module, which is formed of a power circuit and a trigger circuit. Whose function is to control the amount of power supplied to the ceramic resistor having the sterilizer, making a cutout voltage waveform using a triac. A mathematical model fitted to the dynamics of the system was also developed and based on data collected with the support of the software tools Matlab, conducted tests in real time, the transfer function of the plant was obtained to achieve dimensioning parameters PI controller. These parameters were coupled in Arduino PID library which together with an adjustment for test error optimal performance for the team was obtained.

### **Keywords**

**POWER CIRCUIT,  
TRIGGERING CIRCUIT  
PI CONTROL  
ARDUINO**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

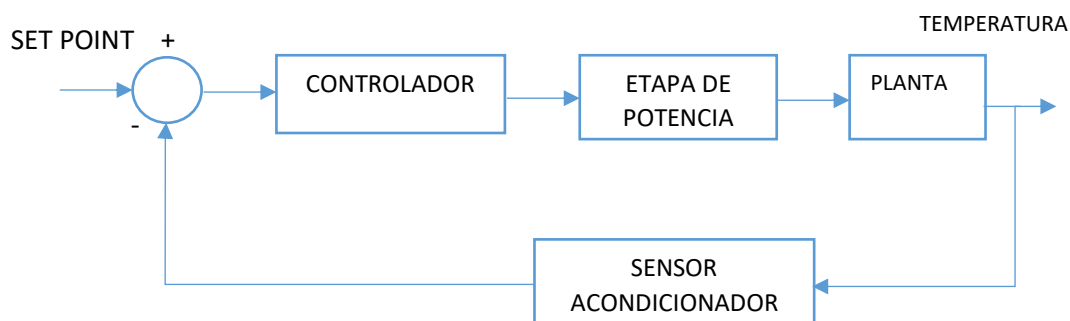
### 1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema automático de control de temperatura en una esterilizadora de calor seco. Dicho equipo es de vital importancia en la clínica, ya que de este depende que los procesos de esterilización del instrumental quirúrgico, sean el adecuado.

Considerando el material que someterá al proceso de esterilización, Se necesita establecer ciclos automáticos a través del control del tiempo, que oscilarán entre 45 y 120 minutos, en función a la temperatura, que oscilarán entre 100 y 160 grados Celsius.

### 1.2. PROCESO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA

La arquitectura empleada para el desarrollo de este proyecto es la de un sistema de una entrada y una salida, con el controlador en cascada con la planta, tal como se muestra en la figura 1.



**Figura 1 Esquema De Control**

Fuente: (Aguado Behar & Martinez Iranzo, 2003)

La planta a controlar está constituida por un sistema térmico y como tal posee una dinámica lenta, consta de una resistencia de cerámica calefactora de 400W montada sobre una placa metálica ubicada en la cubierta de la esterilizadora. La etapa de potencia, está compuesta por una fuente de corriente que tiene como elemento de potencia un triac. El sensor de temperatura es un termopar tipo K, posicionada dentro de la cabina del equipo, mide la magnitud a controlar.

### **1.3. ANTECEDENTES**

El equipo de esterilización es de vital importancia, ya que de este depende que los procesos de esterilización de instrumental quirúrgico para: prótesis, gineco-obtétricos, oftalmológicos, sea confiable.

El equipo necesitó una reestructuración de componentes puesto que los mismo cumplieron con su ciclo de vida, fueron evidentes los problemas que tenía, como por ejemplo fuga de calor debido al deterioro del selle en la puerta, ciclos y temperatura de esterilización manual no confiable, que provocaban daño al material sujeto al proceso de esterilización.

Del análisis realizado se obtiene que:

- La tecnología inmersa en el módulo de control era obsoleta
- Un desgaste en los actuadores
- Los elementos de calentamiento deteriorados
- Sistema mecánico de medición de temperatura en desuso

### **1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

En la actualidad los equipamientos hospitalarios ofertan un sin número de beneficios que gira entorno a un sistema automatizado y para este caso en particular la clínica necesita optimizar tiempo, garantizar sus procesos quirúrgicos y ofrecer un excelente servicio a sus usuarios.

Y en este contexto una parte fundamental es mantener una central de esterilización con procesos fiables y garantizados libres de gérmenes. Para ello la ejecución de este proyecto

permitió repotenciar el equipo de esterilización incrementado el porcentaje de confianza de esterilidad un 75 % dado para esta clase de equipos.

Cabe señalar que la renovación planteada permitirá:

- Funcionamiento autónomo, optimizando el personal médico.
- Reducción de consumo de energía eléctrica debido a los ciclos automáticos en los que trabajará el equipo.
- Fácil adquisición de repuestos, debido a la actualización de componentes electrónicos análogos y digitales.

## **1.5. ALCANCE**

En el diseño e implementación de un sistema automático de control para La Esterilizadora Marca Memmert De La Clínica Materno-Infantil Santa Barbara, se necesita establecer ciclos automáticos de esterilización a través del control del tiempo, que oscilarían entre 45 y 120 minutos, en función a la temperatura, que oscilarían entre 100 y 160 grados Celsius, considerando además las características del material que atravesará dicho proceso.

Otras tareas importantes son establecer un buen sellado en puerta y aislamiento térmico, que conjuntamente con los ciclos automáticos de esterilización garanticen alcanzar un estándar óptimo del 75% de esterilidad de los materiales.

A continuación se explicara brevemente el proceso a seguir:

- Se elegirá el actuador para conducir la planta, paso imprescindible para realizar la identificación del sistema y obtener un modelo matemático aproximado, que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso.
- El diseño de controlador será basado en el modelo desarrollado y los criterios de control se sintonicen a los requerimientos de la planta.
- Como siguiente punto se evaluará los actuadores, sensores, protección, montaje y puesta en marcha del sistema de automatización que se ajusten al mejor desempeño del controlador diseñado para la planta.



- Y como complemento y de forma interrelacionada es el diseño de ingeniería del software aplicado a la planta.

## **1.6. OBJETIVOS**

### **1.6.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un sistema automático de control para la esterilizadora en seco marca Memmert de la Clínica materno-infantil Santa Bárbara.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

- Valorar el estado actual de los componentes electrónicos y mecánicos del equipo que permita definir las mejoras del mismo.
- Determinar la ingeniería del sistema de control para el proceso de esterilización, de modo que permita establecer las condiciones de trabajo del equipo.
- Evaluar y seleccionar soluciones de software que entreguen un soporte informático óptimo al proceso de control automático de la esterilizadora.
- Valorar el estado funcional del equipo renovado.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Con la necesidad de sustentar, cada parte desarrollada en el presente proyecto, es preciso poner a disposición del lector todos los recursos teóricos y bibliográficos necesarios para la comprensión de este documento.

Se comenzará por resumir conceptos relacionados con teoría y modelamiento de sistemas termodinámicos, así también elementos electrónicos necesarios para la construcción de este sistema.

Todos los temas que se tratarán son relevantes y serán de utilidad en el desarrollo del documento; sin embargo por la complejidad o extensión de algunos de ellos se referenciarán a textos bibliográficos especializados que desarrollan la teoría en detalle.

#### **2.1. Termodinámica**

“La temperatura es la medición de la intensidad de calor, se mide normalmente en grados Celsius (°C) o grados Fahrenheit (°F)”. (Enriquez, 2000)

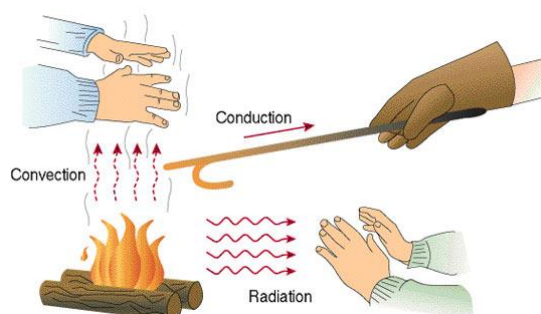
##### **2.1.1. Calor**

Es la energía en tránsito o la forma de energía que es transferida a través de la frontera de un sistema, en virtud de una diferencia de temperaturas para llevar la sustancia a otra temperatura para cambiar de estado físico un fluido.

##### **2.1.2. Propiedades físicas**

En termodinámica se definen algunas propiedades físicas que se relacionan con la temperatura y el flujo de calor, una de estas es la transferencia de calor que se presenta de la

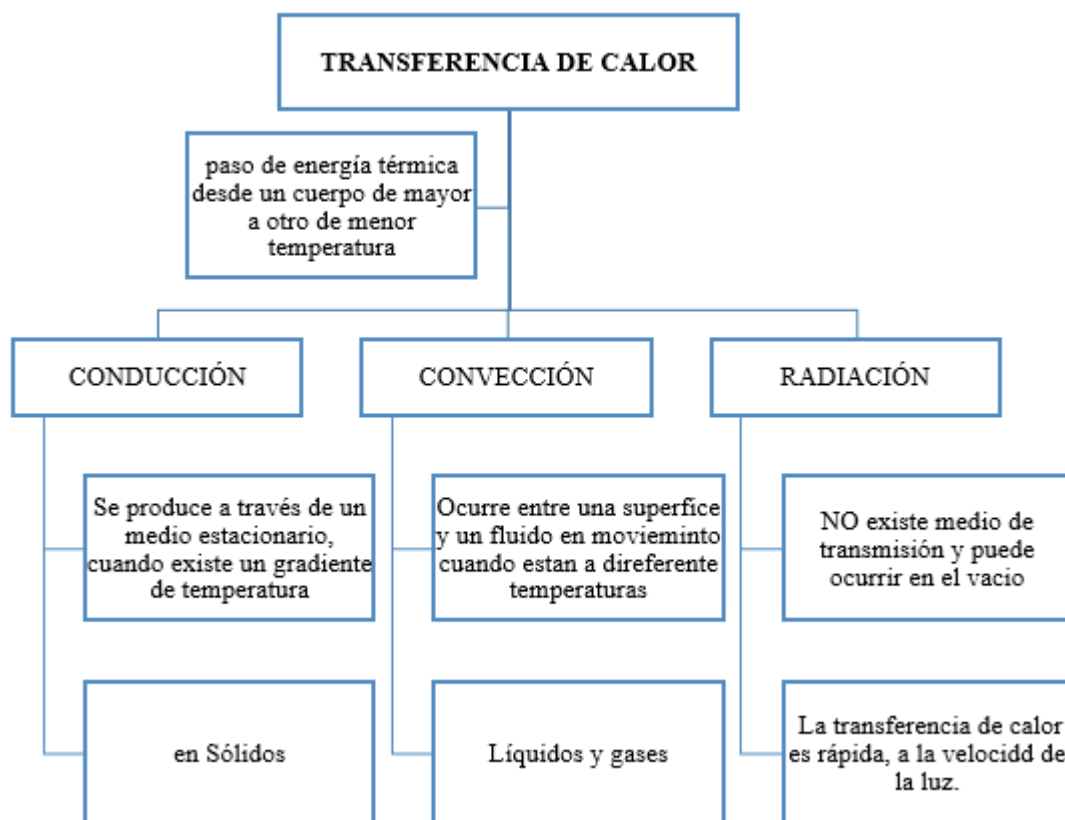
siguiente forma: por conducción, convección y radiación, como se ilustra en la figura 2. En la práctica el intercambio de calor puede mezclar los 3 modos.



**Figura 2 Ejemplo de tipos de transferencia de calor**

Fuente: (Nergiza, 2013)

En la Figura 3 se define cada tipo de transferencia de calor



**Figura 3 Definición de los tipos de transferencia de calor**

## 2.2. Instrumentos de medición

Existe una amplia gama de instrumentos para la medición de temperatura y se debe especialmente al proceso y materiales a medir, como por ejemplo fluidos que no se congelan, metales líquidos, gases y vapores, entre otros.

### 2.2.1. Escala de temperatura

Se requiere una escala de temperatura que se pueda usar en el instrumento, en la industria se usa la escala dada en Celsius y Fahrenheit. En los instrumentos registradores se requiere que exista una relación proporcional definida entre el medio detector y el cambio de temperatura.

Esta relación no tiene que ser lineal, debe existir una relación termodinámica entre los dos extremos del rango indicado o del control con la temperatura para que suscriba en la escala del instrumento medidor o de control.

## 2.3. Análisis de tipo de sensores

En la actualidad existe gran variedad de instrumentos para realizar la *medición* de temperatura, como por ejemplo:

- Termómetro de vidrio
- termómetro bimetalico
- termómetro de bulbo y capilar

Puesto que estos instrumentos no entregan una señal eléctrica, se descarta su análisis. Dado que en este proyecto se requiere controlar electrónicamente el dispositivo de medición de temperatura es indispensable que cumpla con las siguientes características:

- Tener una salida con señal eléctrica
- El rango de temperatura para esta aplicación es de 0° a 200°C

Actualmente existe una gran diversidad de instrumentos de medición de temperatura para elegir el sensor adecuado para este proyecto:

- Termopar

- Termómetro de resistencia
- Termistor

Para este proyecto se ha considerado el uso de un termopar tipo K, como sensor de medición de temperatura, dado que el rango de operación del equipo es de 0°C a 200°C, porque las características que posee este sensor son favorables, para los cálculos que se realizaran posteriormente.

### 2.3.1. Termopar

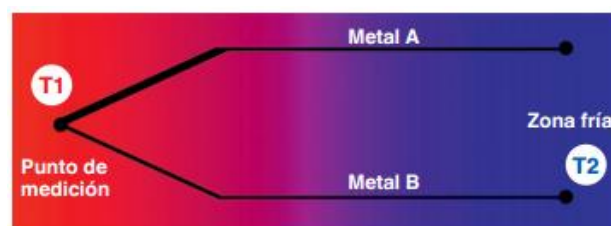
Un termopar, es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeñas (del orden de los milivoltios) que es la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente o unión caliente” y el otro llamado “punto frío o unión fría”, siendo el nodo de unión el punto de medición. (Wika, 2014)



**Figura 4 Partes de un termopar**

Fuente: (Wika, 2014)

La medición se basa en el efecto de Seebeck, este efecto provoca la conversión de una diferencia de temperatura en electricidad.



**Figura 5 Efecto termoeléctrico=efecto de Seebeck**

Fuente: (Wika, 2014)

Como se observa en la figura 5, Se crea un voltaje en presencia de una diferencia de temperatura entre dos metales o semiconductores homogéneos. Las temperaturas T1 y T2 en las juntas entre los metales A y B provocan una diferencia de potencial V.

Un termopar no mide la temperatura absoluta, sino la temperatura diferencial entre el

T1: punto de medición (hot junction) y la

T2: zona fría (cold junction)

La dependencia entre el voltaje entregado por el termopar la temperatura no es lineal (no es una recta), es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termopar, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.

Cuando el instrumento está muy retirado del lugar de medición, no siempre es posible llegar con el mismo cable del termopar al instrumento. Esto ocurre especialmente cuando se están usando termopares R, S o B hechas con aleación de platino de muy alto precio. La solución de este problema es usar los llamados "cables compensados" para hacer la extensión del cable.

Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck del termopar, pero hechos de otro material de menor precio y por lo tanto no generan termopares parásitos en el empalme.

Los cables compensados tienen una polaridad de conexión positiva y negativa, que al conectarse con el termopar se debe respetar. Un error típico, es conectar al revés el cable en el termopar y en el instrumento, de esta forma se genera un error en la lectura del orden de la temperatura de ambiente en el empalme.

En la Tabla 1, se detallan la composición de los termopares, empleados con mayor frecuencia.

### **2.3.2. Condiciones y Aplicaciones de un termopar**

No es recomendable usar termopares cuando el sitio de medición y el instrumento están lejos, más de 10 a 20 metros de distancia. El problema de los termopares es que suministran un voltaje muy bajo y susceptible a recibir interferencias eléctricas.

Además para hacer la extensión se debe usar un cable compensado para el tipo específico de termopar lo que aumenta el costo de la instalación. Tampoco es recomendable usar termopares cuando es necesaria una lectura de temperatura muy precisa (décima de °C) pues la compensación de cero requerida por los termopares introduce un error típicamente del orden de 0.5 °C.

Otro problema que puede ocurrir con los termopares es que alguna contaminación u oxidación en los metales de la unión podría provocar una lectura errónea (hasta 4 ó 5 ° C) sin que se detecte la falla. Luego en algunos casos es conveniente verificar periódicamente la precisión de la lectura.

**Tabla 1**

**Tipos de termopares**

<b>Tipo</b>	<b>Positivo</b>	<b>Negativo</b>	<b>Rango operación</b>	<b>Uso en la industria</b>
<b>T</b>	Cobre	Constantán	-18.5°C a 379°C	Eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los PT100
<b>J</b>	Hierro	Constantán	-15°C a 750°C	Usado en la industria del plástico, goma(extracción e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas(Zamac, aluminio)
<b>K</b>	Cromel	Alumel	-180°C a 580°C	Usado en fundición y hornos a temperaturas menores a 1300°C y hornos de tratamientos térmicos
<b>R, S</b>	Platino +13% radio	Platino	1650°C	Se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero)

Normalmente los termopares industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material, existen una infinidad de tipos de termopares, pero frecuentemente se utilizan las de tipo J o tipo K y en la tabla 2, se estable características para el uso adecuado.

**Tabla 2**

**Uso de termopares tipo J y tipo K**

Usar termopar J	Usar termopar K
Mediciones de 0 a 700 °C Industria del plástico y goma (extrusión e inyección)	Fundición de metales hasta 1300°C (no ferrosos)
Medición en tambores rotatorios con termopar de contacto.	Hornos en general
Temperatura de motores (carcaza) con termopar autoadhesiva.	Usar cuando hay que poner los termopares en vainas muy delgadas Por ejemplo en agujas de una jeringa para tomar temperatura en el interior de una fruta.
Procesos en general donde el sensor está sometido a vibración.	

Fuente: (Martínez & Azuaga, 1997)

## 2.4. Modelamiento del sistema térmico

### 2.4.1. Introducción

Los sistemas térmicos presentan varios efectos no lineales, los cuales se utilizan para identificar la planta y su modelamiento, como por ejemplo la saturación y los tiempos de retardo, para cual es conveniente realizar aproximaciones a sistemas lineales, para lo cual se debe establecer un punto de equilibrio.

Para lograr una acción de control es necesario obtener una aproximación lineal del comportamiento de la planta en su totalidad, identificar las perturbaciones que pueden afectar la dinámica del sistema.

Existen un sin números de posibles acciones de control de los cuales para el desarrollo de este proyecto será analizados el controlador PI.

Modelar un sistema consiste en identificarlo matemáticamente de esta manera llegar a describir en forma exacta y sencilla su comportamiento. Las consideraciones y aproximaciones deben basarse en la iteración de las repuestas que el modelo presenta con respecto a las que debería tener con el sistema real.



### 2.4.2. Variables internas del sistema térmico

Para iniciar el modelamiento a partir de las variables a controlar, se debe definir cuáles son las variables de entrada y de salida y las variables internas del proceso, como se detalla en la tabla 3, adicionalmente las constantes y los parámetros que intervienen, de esta forma establecer la relación matemática que los involucre a cada uno de ellos.

**Tabla 3**

**Relación matemática del sistema térmico**

Descripción	Nomenclatura	Unidades
Temperatura	T	[°C]
Potencia=Flujo de calor por unidad de tiempo	$f = \frac{dQ}{dt}$	[w]
Energía	$Q = \int f dt$	[J]
calor específico	C	
Resistencia térmica	$R = \frac{\Delta T}{f}$	$\left[\frac{°C}{w}\right]$

Fuente: (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

En la esterilizadora de calor seco, el tipo de transferencia de calor, que ocurre dentro del equipo, es por convección, lo cual tiene lugar cuando áreas de fluido caliente ascienden hacia las regiones de fluido frío. Cuando esto ocurre, el fluido frío desciende tomando el lugar del fluido caliente que ascendió. Este ciclo da lugar a una continua circulación en que el calor se transfiere a las regiones frías. El calor en este caso se transfiere por la circulación del aire.

La cantidad de calor movida que depende de cuánto calor puede transportar el medio se define como:

$$TQ = hA(T_{in} - T) \text{ Donde:}$$

$$Q = \text{cantidad de calor}$$

$$h = \text{coeficiente de transferencia de calor, AIRE es } 5 < h < 30$$

$$A: \text{área de superficie normal a la dirección de flujo}$$

Considerando que la temperatura es homogénea dentro de la cabina de la esterilizadora, en un punto se genera:

$P(w)$ : potencia calorífica

$P_c(w)$ : potencia calorífica para calentar un cuerpo

$P_{ext}(w)$ : potencia calorífica al exterior del equipo

$R$  : resistencia, capacidad del material a oponerse al flujo del calor,

$C$  : capacidad térmica, cantidad de calor absorbida al elevar  $1^\circ C$

Considerando que la temperatura será homogénea, en la cabina del equipo, se tiene que por convección se transmitirá calor del punto que genera potencia hacia todo el interior de la esterilizadora. La resistencia de cerámica colocada dentro del esterilizador genera una potencia, que es fuente de flujo de calor, que es equivalente a la potencia disipada por la Resistencia, lo cual se puede expresar como:

$$f \approx P = V * I$$

$P$ : potencia generada por el flujo de calor

$V$ : voltaje

$I$ : corriente

## 2.5. Identificación de la planta

La identificación de la planta tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso. De la exactitud del modelo obtenido dependerá posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado. (Aguado Behar & Martínez Iranzo, 2003)

Existen dos métodos básicos:

- Identificación analítica (modelado)
- Identificación experimental (identificación clásica).

### 2.5.1.1. Señales de prueba típica

Las señales de prueba que se usan regularmente son funciones escalón, rampa, parábola, impulso, senoidales, etc. Con estas señales de prueba, es posible realizar con

facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control, dado que las señales son funciones del tiempo muy simples.

Si las entradas para un sistema de control son funciones del tiempo que cambian en forma gradual, una función rampa sería una buena señal de prueba. Asimismo, si un sistema está sujeto a perturbaciones repentinas una función escalón sería una buena señal de prueba; y para un sistema sujeto a entradas de choque, una función impulso sería la mejor.

Una vez diseñado un sistema de control con base en las señales de prueba, por lo general el desempeño del sistema en respuesta a las entradas reales es satisfactorio. El uso de tales señales de prueba permite comparar el desempeño de todos los sistemas sobre la misma base. (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

#### **2.5.1.2. Respuesta transitoria y respuesta en estado estable**

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estable. Por respuesta transitoria nos referimos a la que va del estado inicial al estado final. Por respuesta en estado estable, nos referimos a la manera en la cual se comporta la salida del sistema conforme  $t$  tiende a infinito.

#### **2.5.2. Estabilidad absoluta, estabilidad relativa y error en estado estable**

La característica más importante del comportamiento dinámico de un sistema de control es la estabilidad absoluta, es decir, si el sistema es estable o inestable. Un sistema de control está en equilibrio si, en ausencia de cualquier perturbación o entrada, la salida permanece en el mismo estado.

Un sistema de control lineal e invariante con el tiempo es estable si la salida termina por regresar a su estado de equilibrio cuando el sistema está sujeto a una condición inicial.

Un sistema de control lineal e invariante con el tiempo es críticamente estable si las oscilaciones de la salida continúan para siempre. Es inestable si la salida diverge sin límite a partir de su estado de equilibrio cuando el sistema está sujeto a una condición inicial. En realidad, la salida de un sistema físico puede aumentar hasta un cierto grado, pero puede estar limitada por “detenciones” mecánicas o el sistema puede colapsarse o

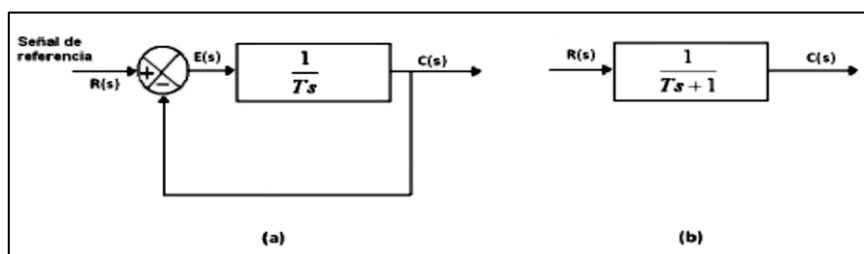
volverse no lineal después de que la salida excede cierta magnitud, por lo cual ya no se aplican las ecuaciones diferenciales lineales.

Entre los comportamientos importantes se debe recibir una cuidadosa consideración en la estabilidad relativa y el error en estado estable. Dado que un sistema de control físico implica un almacenamiento de energía, la salida del sistema, cuando este está sujeto a una entrada, no sucede a la entrada de inmediato, sino que exhibe una respuesta transitoria antes de alcanzar un estado estable.

La respuesta transitoria de un sistema de control práctico con frecuencia exhibe oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar un estado estable. Si la salida de un sistema en estado estable no coincide exactamente con la entrada, se dice que el sistema tiene un error en estado estable. Este error indica la precisión del sistema. Al analizar un sistema de control, debemos examinar el comportamiento de la respuesta transitoria y el comportamiento en estado estable.

### 2.5.3. Sistemas de primer Orden

Físicamente, este sistema representa un circuito  $RC$ , un sistema térmico o algo similar. La Figura 6 presenta (a) diagrama de bloques de un Sistema de primer orden; (b) diagrama de bloques simplificado.



**Figura 6 (a) Diagrama de bloques de un Sistema de Primer Orden**

Fuente: (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

La relación entrada-salida se obtiene mediante:

$$\frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \dots\dots\dots(2.1)$$

La respuesta escalón unitario de sistemas de primer, Como la transformada de Laplace de la función escalón unitario es  $\frac{1}{s}$ , sustituyendo  $R_{(s)} = \frac{1}{s}$  en la ecuación (2.1), se obtiene:

$$C_{(s)} = \frac{1}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s} \dots\dots\dots(2.2)$$

Si se desarrolla  $C(s)$  de la ecuación (2.2) en fracciones simples se obtiene

$$C_{(s)} = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts+1} = \frac{1}{s} - \frac{T}{s + \left(\frac{1}{T}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

Si se toma la transformada inversa de Laplace de la ecuación (2.3)

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, t \geq 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

La ecuación (2.4) plantea que la salida  $c(t)$  es inicialmente cero y al final se vuelve unitaria. Una característica importante de tal curva de respuesta exponencial  $c(t)$  es que, para  $t=T$ , el valor de  $c(t)$  es 0.632, o que la respuesta  $c(t)$  alcanzó 63.2% de su cambio total. Esto se aprecia con facilidad sustituyendo  $t=T$  en la ecuación (2.4). Es decir,

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} = 1 - e^{-1} = 0.632 \dots\dots\dots(2.5)$$

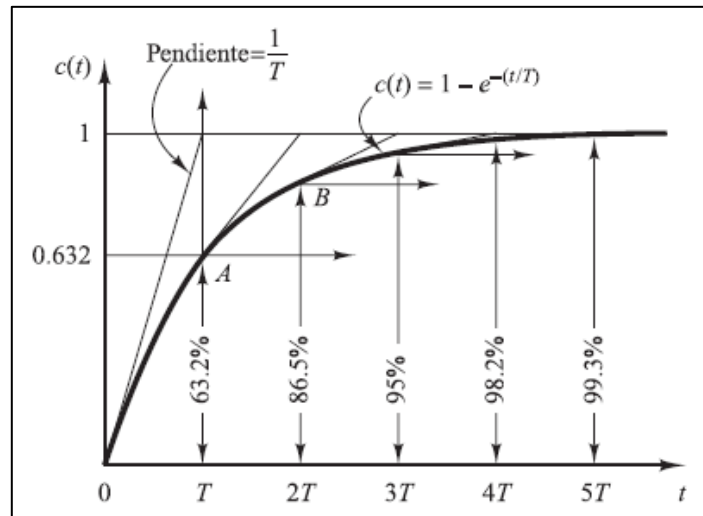
Conforme más pequeña es la magnitud de la constante de tiempo  $T$ , más rápida es la respuesta del sistema. La curva de respuesta exponencial  $c(t)$  caracterizada por la ecuación (2.5), se muestra en la figura 7.

En una constante de tiempo, la curva de respuesta exponencial ha ido de 0 a 63.2% del valor final. En dos constantes de tiempo, la respuesta alcanza 86.5% del valor final.

Fuente: (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

En  $t=3T$ ,  $4T$  y  $5T$ , la respuesta alcanza 95%, 98.2% y 99.3%, respectivamente, del valor final. Por tanto, para  $t \geq 4T$ , la respuesta permanece dentro del 2% del valor

final. Por tanto, con base en la ecuación (2.5), el estado estable se alcanza matemáticamente sólo después de un tiempo infinito.



**Figura 7** Respuesta escalón para un sistema de primer orden

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

Sin embargo, en la práctica, una estimación razonable del tiempo de respuesta es la magnitud de tiempo que necesita la curva de respuesta para alcanzar la línea de 2% del valor final, o cuatro constantes de tiempo.

#### 2.5.4. Controlador Proporcional Integrativo PI

El controlador PI se caracteriza por la función de transferencia

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

El controlador PI es un compensador de atraso. Tiene un cero en  $s = -\frac{1}{T_i}$  y un polo en  $s=0$ . Por tanto, la característica del controlador PI es de ganancia infinita a una frecuencia cero. Esto mejora las características en estado estacionario. Sin embargo, la inclusión de la acción de control

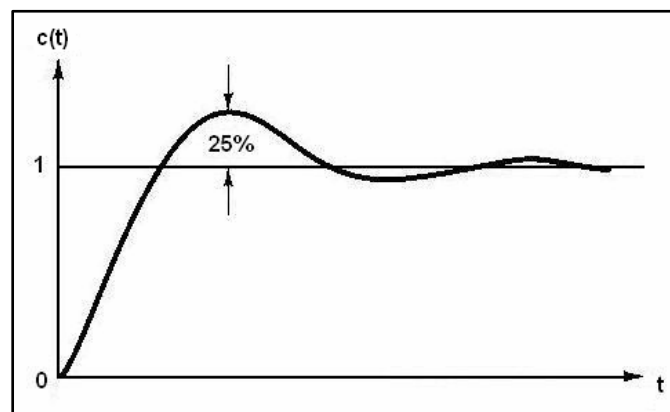
PI en el sistema incrementa en 1 el tipo del sistema compensado, y esto provoca que el sistema compensado sea menos estable o, incluso, que se pueda hacer inestable. Por tanto, deben elegirse con cuidado los valores de  $K_p$  y  $T_i$  para asegurar una respuesta transitoria adecuada.

Si el controlador PI se diseña adecuadamente, es posible hacer que la respuesta transitoria para una entrada escalón no presente ninguna sobre elongación o presente una relativamente pequeña. Sin embargo, la velocidad de respuesta se hace mucho más lenta, debido a que el controlador PI, al ser un filtro paso baja, atenúa las componentes de frecuencia alta de la señal.

### 2.5.5. Reglas de Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , del tiempo integral  $T_i$  y del tiempo derivativo  $T_d$ , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Tal determinación se realiza en el sitio mediante experimentos sobre la planta.

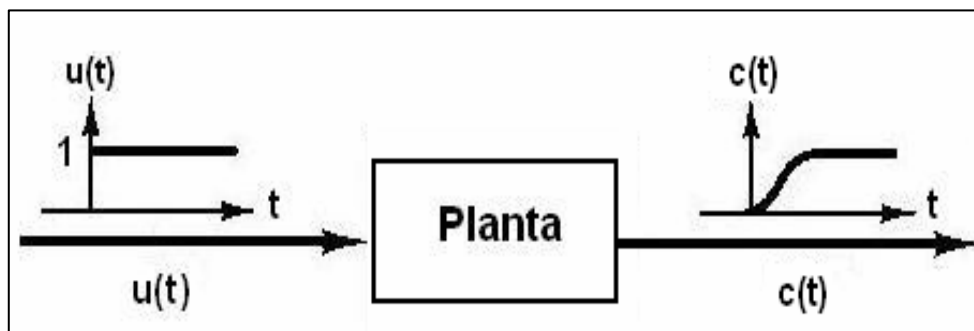
Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, en ambos se pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón, como se muestra en la figura 8.



**Figura 8 Curva de respuesta escalón unitario, sobrepaso máximo de 25%**

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

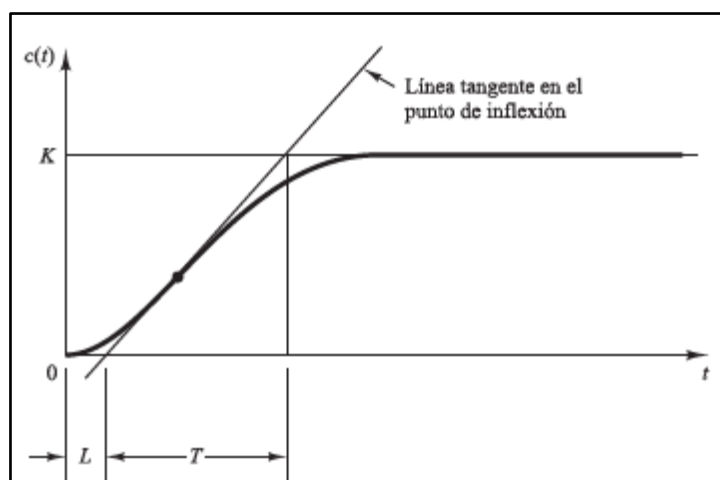
En el presente trabajo, sin embargo, sólo se analizará el primer método, en el cual la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, según se puede observar en la figura 9.



**Figura 9 Respuesta escalón unitario de una planta**

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, y se denomina curva de reacción, según se muestra en el figura 10.



**Figura 10 Curva de reacción con, forma de S**

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

Si la respuesta no exhibe una curva con forma de S, este método no es pertinente. Tales curvas de respuesta escalón se generan experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

- La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros:
- el tiempo de retardo  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$



Un método para determinar el tiempo de retardo y la constante de tiempo es dibujar una recta tangente en el punto de inflexión de la curva de reacción, como se observa en la figura 10 y determinar las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea  $c(t) = K$ .

De este modo en la tabla 4 se obtienen los valores para cada tipo de controlador, según las Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (Primer método).

En este caso, la función de transferencia  $\frac{C(s)}{U(s)}$  se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte de este modo se representa la ecuación (2.6).

**Tabla 4**

**Regla de sintonía de Ziegler-Nichols (Primer método)**

Tipo de controlador	$K_P$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(2.6)$$

Donde:

K es la ganancia del proceso en estado estacionario

$t_0$  es el tiempo muerto del proceso

$\tau$  es la constante de tiempo del proceso

### 2.5.6. Curva de reacción del proceso

Este método consiste en la construcción gráfica de la respuesta del proceso a un cambio escalón en la salida del controlador.

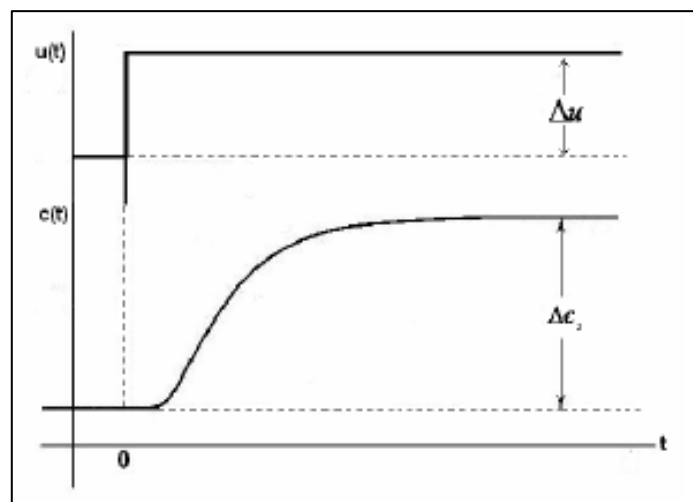
La prueba se realiza como sigue:

1. Se deja que el proceso alcance un estado de equilibrio previo.
2. Se aplica al proceso un cambio escalón en la señal de salida del controlador en lazo abierto (ya sea incremento o decremento).
3. Se recaban datos de la respuesta de la variable controlada.

En la figura 11 se muestra una gráfica típica de la prueba. o respuesta escalón de circuito abierto.

El siguiente paso es hacer coincidir la curva de reacción del proceso con el modelo de un proceso simple para determinar los parámetros del modelo.

El término  $\Delta c$  es la perturbación o cambio de salida de la variable de proceso respecto a su valor inicial vista en la ecuación (2.7), si se tiene en cuenta que la respuesta del modelo debe coincidir con la curva de reacción del proceso en estado estable.



**Figura 11 Curva de reacción del proceso**

Fuente (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

Se puede calcular la ganancia de estado estacionario del proceso con la ecuación (2.9), la cual es uno de los parámetros del modelo que describe la ecuación (2.6).

El tiempo muerto  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$ , se localizan con la ecuación (2.11), calculada con base en la respuesta escalón en la salida del controlador y un modelo de primer orden más tiempo muerto.

$$\Delta c(t) = c(t) - c(0) \dots \dots \dots (2.7)$$

Se define  $\Delta c_s(t)$  como

$$\Delta c_s(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta c(t) = k \Delta u \dots \dots \dots (2.8)$$

*Ganancia del proceso :*

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta u} \dots \dots \dots (2.9)$$

El tiempo muerto  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$

$$\left( t_0 + \frac{1}{3\tau} \right) y(t_0 + \tau) \dots \dots \dots (2.10)$$

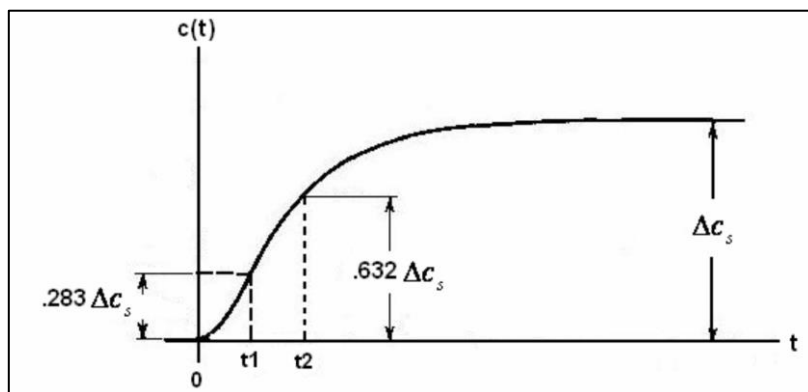
$$\Delta c(t) = K \Delta m.u(t-t_0) \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \right] \dots \dots \dots (2.11)$$

sustituyendo (2.10) en (2.11)

$$\Delta c(t_0 + \tau) = K \Delta u \left[ 1 - e^{-1} \right] = 0.632 \Delta c_s \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\Delta c\left(t_0 + \frac{1}{3\tau}\right) = K \Delta u \left[ 1 - e^{-\left(\frac{1}{3}\right)} \right] = 0.283 \Delta c_s \dots \dots \dots (2.13)$$

Estos dos puntos, ilustrados en la siguiente figura 12, se denominan  $t_2$  y  $t_1$ , respectivamente.



**Figuran 12 Parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto**

Fuente ( (Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 2003)

Los valores de  $t_0$  y  $t_1$  se pueden obtener fácilmente mediante la simple resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$(t_0 + \tau) = t_2 \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\left(t_0 + \frac{1}{3\tau}\right) = t_1 \dots \dots \dots (2.15)$$

Se reduce:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 + t_1) \dots \dots \dots (2.16)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \dots \dots \dots (2.17)$$

Donde

$$t_1 = \text{tiempo en el cual } \Delta c = 0.283\Delta c_s \dots \dots \dots (2.18)$$

$$t_2 = \text{tiempo en el cual } \Delta c = 0.632\Delta c_s \dots \dots \dots (2.19)$$

### 2.5.7. Sistemas con retardo de transporte

Estos sistemas se caracterizan debido a que la salida no comienza a responder a la entrada sino hasta después de un intervalo de tiempo dado. Los sistemas que están descritos inherentemente por funciones de transferencia trascendentales son más difíciles de manejar. Muchas herramientas analíticas, tal como el criterio de Routh-Hurwitz, están restringidas a funciones de transferencia racionales.

Existen muchas formas de aproximar a  $e^{-t_0s}$  por una función racional. Una aproximación es la de Padé, la cual está dada por una aproximación de dos términos:

$$e^{-t_0s} = \frac{1 - \frac{t_0s}{2}}{1 + \frac{t_0s}{2}} \dots \dots \dots (2.20)$$

Si se sustituye en ecuación (2.6)

$$G(s) = \frac{K \left( \frac{1 - \frac{t_0s}{2}}{1 + \frac{t_0s}{2}} \right)}{\tau s + 1} = \frac{K \left( \frac{2 - t_0s}{2 + t_0s} \right)}{\tau s + 1} = \frac{K(2 - t_0s)}{(\tau s + 1)(2 + t_0s)} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$G(s) = \frac{K(2 - t_0s)}{t_0\tau s^2 + (t_0 + 2\tau)s + 1} \dots \dots \dots (2.22)$$

### 2.5.8. Controlador digital

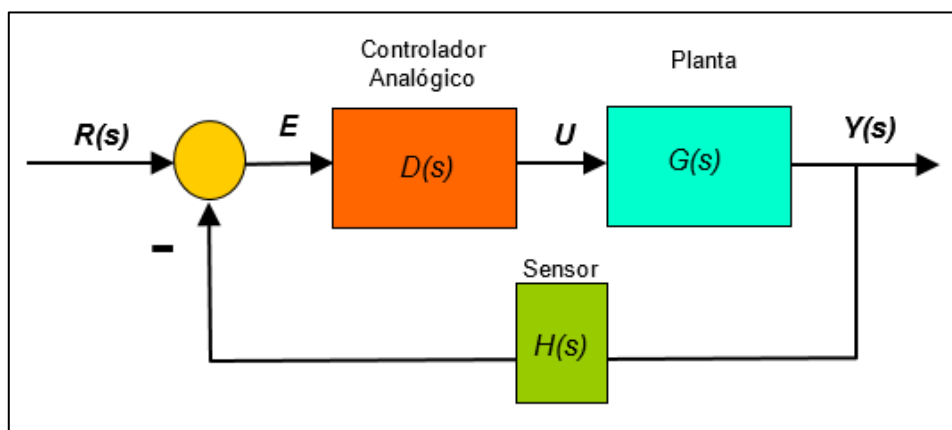
El punto de partida es un diseño de un controlador en el dominio de la variable  $s$ , es decir:

$D(s)$  para una planta  $G(s)$

Es posible realizar el diseño directamente o rediseñar el controlador en el dominio de los sistemas muestreados, es decir en el dominio  $z$ , las dos opciones son posibles, sin embargo en este caso se abordara la traslación directa del diseño analógico al digital, o lo que es lo mismo, del dominio  $s$  al dominio  $z$ .

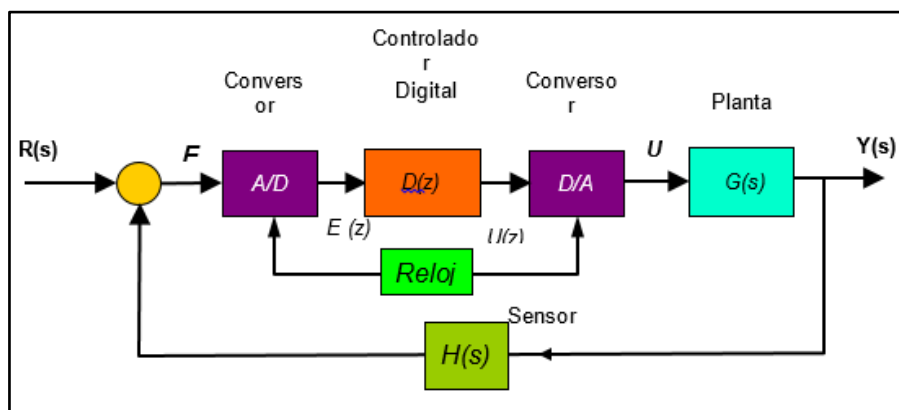
En la figura 13 y 14 se muestra una comparación del sistema de control analógico con un sistema de control digital equivalente, en el que se observa que la parte digital consta de un conversor análogo digital y un tiempo de muestreo dada por una señal de reloj.

Mientras menor es el tiempo de muestreo, la señal digital se parece más a la señal continua, esto es, el error es menor.



**Figura 13 Sistema de control analógico**

Fuente (Jordán, 2015)



**Figura 14 Sistema de control digital Equivalente**

Fuente (Jordán, 2015)

A fin de encontrar una relación entre el dominio de la variable de Laplace  $s$  y el dominio de la variable de muestreo (variable discreta  $z$ ).

F.T. Controlador PID en controladores analógicos:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

F.T. Controlador PID expresado por Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = (k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s)$$

F.T. Controlador PID digital :

$$U(z) = K \left[ 1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z) \dots \dots (2.23)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \left[ K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d (1-z^{-1}) \right] \dots \dots (2.24)$$

Donde :

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_i}{2}, \text{Ganancia proporcional} \dots \dots (2.25)$$

$$K_i = \frac{KT}{T_i}, \text{Ganancia integral} \dots \dots (2.26)$$

$$K_d = \frac{KT_d}{T}, \text{Ganancia derivativa} \dots \dots (2.27)$$

La función de transferencia discreta, también puede ser representada como:

Reescribiendo F.T. Controlador PID digital

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \left[ K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1}) \right]$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \left[ a + \frac{b}{1-z^{-1}} + c(1-z^{-1}) \right]$$

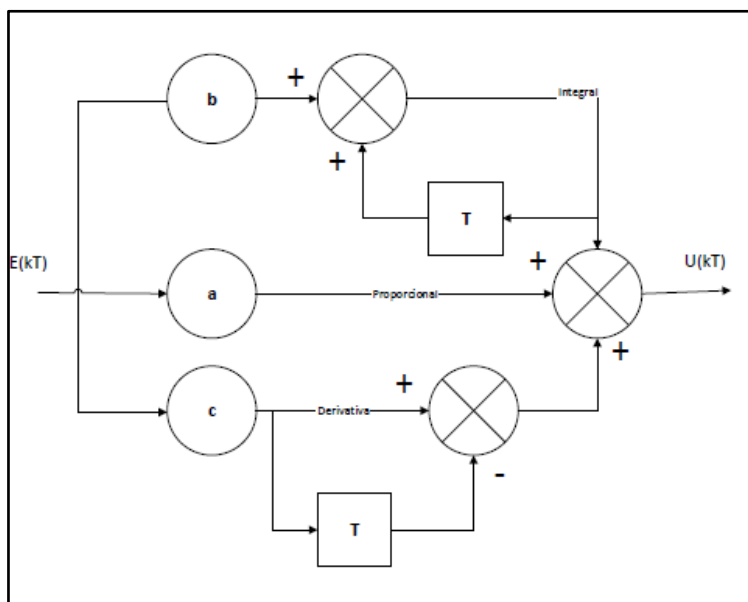
Donde :

$a = K_p$ , Ganancia proporcional

$b = \frac{K_p T}{T_i}$ , Ganancia integral

$c = \frac{K_p T_d}{T}$ , Ganancia derivativa

Existen distintas posibilidades de la realización práctica de un controlador PID, una de las más habituales es la realización en paralelo, como se muestra en la figura 15.

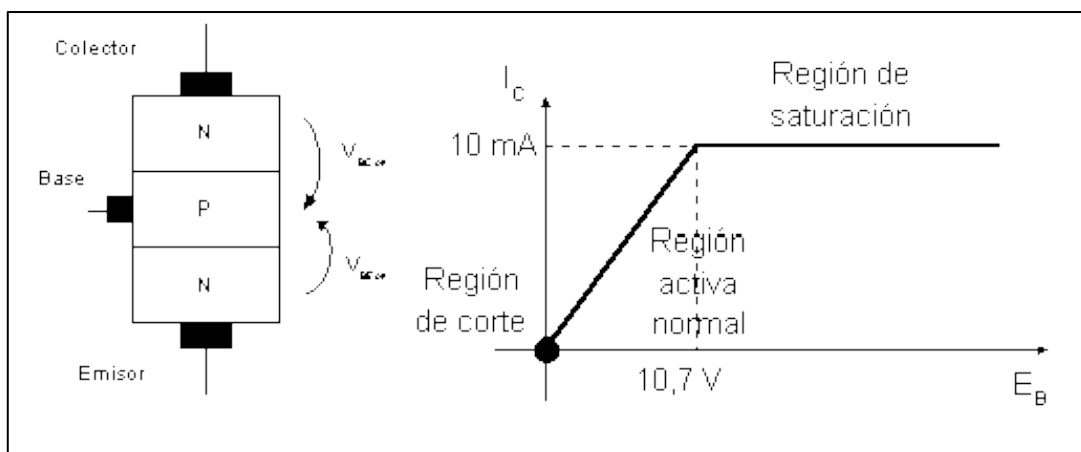


**Figura 15 Diseño paralelo de controlador PID**

Fuente: (Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, 1996)

### 2.5.9. Saturación

La saturación se define como un efecto causado, generalmente, por limitaciones físicas de los componentes que utiliza el sistema y por limitaciones en las condiciones de operación, en el ejemplo de un sistema térmico puede estar dado por la potencia mínima y máxima que puede recibir el actuador y la temperatura mínima y máxima que el sistema puede entregar, como la que genera un transistor como se observa en la figura 16.



**Figura 16 Saturación de un transistor que actúa como un interruptor**

Fuente: (Chapman, 2000)

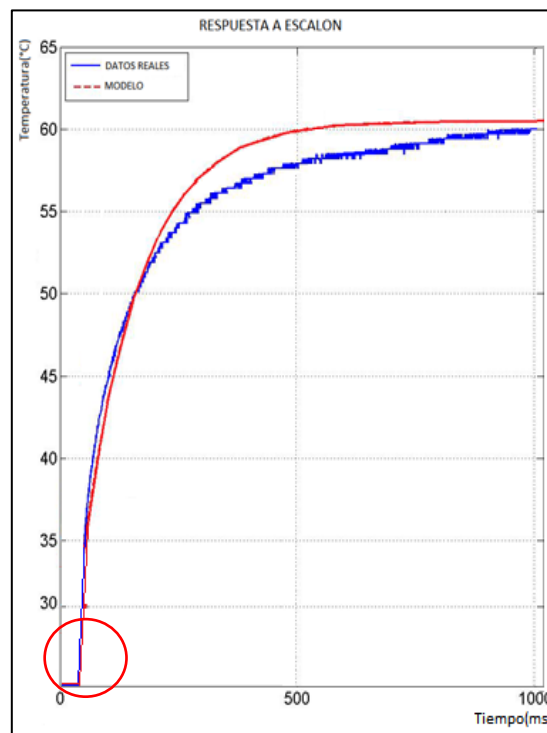
### 2.5.10. Retardos

En sistemas físicos el efecto de retardo se entiende como el tiempo que se demora la salida en tomar el valor esperado después de aplicar una entrada válida. Para sistemas térmicos es de esperarse valores considerables en los retardos debido a que este tipo de sistemas es lento y su salida no toma el valor deseado de forma instantánea.

En general los dispositivos de electrónica de potencia tienen retardos asociados ya que no se puede cambiar la acción de control hasta el próximo instante de switching. En promedio el retardo de transporte es típicamente la mitad del período de switching.

En la figura 17, se puede observar el retardo en transporte que generó la planta, ante una respuesta al escalón.





**Figura 17 Respuesta de la planta ante una entrada escalón**

## 2.6. Microcontrolador Arduino Uno

Arduino es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip.

Un Arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. También dispone de entradas y salidas analógicas.

Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM. Arduino UNO es la última versión de la placa, existen dos variantes, la Arduino UNO convencional y la Arduino UNO SMD.

La única diferencia entre ambas es el tipo de microcontrolador que montan.

- La primera es un microcontrolador Atmega en formato DIP.
- Y la segunda dispone de un microcontrolador en formato SMD

El Software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring, muy similar al lenguaje C. El programa en cuestión es el IDE (Integrated Development Environment).

En la Tabla 5, se describe un resumen de características.

- Serial: 0 (RX) y 1 (TX). Estos pines se usan para la comunicación serie. Están conectados al chip ATmega 16u2 para la conversión USB a TTL Serial data.
  - PWM (Pulse-Width Modulation): 3, 6, 5, 9, 10,11. Proporcionan una salida PWM de 8 bits a 490Hz.
  - SPI: 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK). Estos pines soportan la comunicación SPI.
  - Interrupciones externas: 2 y 3. Estos pines se pueden configurar para llamar una función del programa cuando reciben una interrupción externa.
  - Led: 13. Hay un led conectado al pin 13. Cuando el pin tiene un valor high, el led se enciende. Cuando el pin tiene un valor low, el led se apaga.
  - El Arduino Uno también tiene 6 entradas analógicas (A0 a A5). Cada pin tiene 10 bits (1024 valores) y trabajan a 5V. También hay pines analógicos con características especiales:
    - I2C: A4 o pin SDA y A5 o pin SCL. Soportan la comunicación I2C (TWI).
    - Aref: Voltaje de referencia de las entradas analógicas. Sirve para cambiar a través de programación el voltaje máximo de entrada de los pines analógicos.
    - Reset. Colocando este pin a LOW se reinicia el programa.
    - Power: El Arduino Uno puede alimentarse a través de la conexión USB o con una alimentación externa DC o los pines Vin y GND. La placa soporta un mínimo de 6V y un máximo de 20V, aunque es recomendable alimentarla entre 7V – 12V para evitar dañar la placa.

**Tabla 5**  
**Características Arduino UNO**

CARACTERÍSTICAS	ARDUINO UNO
Microcontrolador Atmega	328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 – 12V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20V
Pines para entrada- salida digital.	14(6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines de entrada analógica.	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin	3.3V 50 mA
Memoria Flash	32 KB(0,5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

Fuente: (García, 2016)

- Comunicación: El Arduino Uno puede comunicarse con un ordenador, otra placa Arduino u otros microcontroladores a través del puerto serie utilizando los pines 0(RX) y 1(TX). El chip ATmega 16u2 de la placa convierte la comunicación serie a USB y aparece como un puerto virtual (COM) al ordenador. En la placa hay dos leds (RX y TX) los cuales parpadean cuando hay una transmisión de datos vía Serial to USB con el ordenador (pero no parpadean cuando hay una comunicación Serial con los pines 0 y 1).
- El Atmega328 también soporta comunicaciones I2C y comunicaciones SPI. En la Figura 16 se puede observar la estructura del Arduino.

### **2.6.1. Convertidor analógico – digital**

El controlador Atmega que usa ARDUINO lleva incluido un conversor analógico-digital (A/D) de 6 canales analógicos (A0 – A5). Tiene una resolución de 10 bits, retornando enteros desde 0 a 1023.

Divididos entre 0 a 5V analógicos aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango utilizando el pin AREF. Mientras que el uso principal de estos pines por los

usuarios de ARDUINO es para la lectura de sensores analógicos, estos pines tienen también la funcionalidad de los pines de entrada-salida de propósito general (GPIO) (al igual que los pines digitales 0 - 13).

Cabe mencionar, que esto son pines de ARDUINO y no corresponden con los números de los pines físicos del chip Atmega. Los pines analógicos, pueden usarse de manera idéntica que los digitales.

**AREF:** La tensión aplicada en el pin AREF será la que haga que el conversor A/D de su máxima lectura (1023) cuando lea una tensión igual a la aplicada en ese pin. La Tensión aplicada por debajo de esa tensión conectada a AREF será escalada proporcionalmente, así cuando usemos la tensión de referencia por defecto (DEFAULT) el valor que nos devuelve una tensión de 2.5V en una entrada analógica será 512.

La configuración por defecto del ARDUINO es la de no tener nada conectado de forma externa al pin AREF (El pin 21 del chip Atmega, se muestra en la figura 18 el esquema de configuración de un Arduino Uno

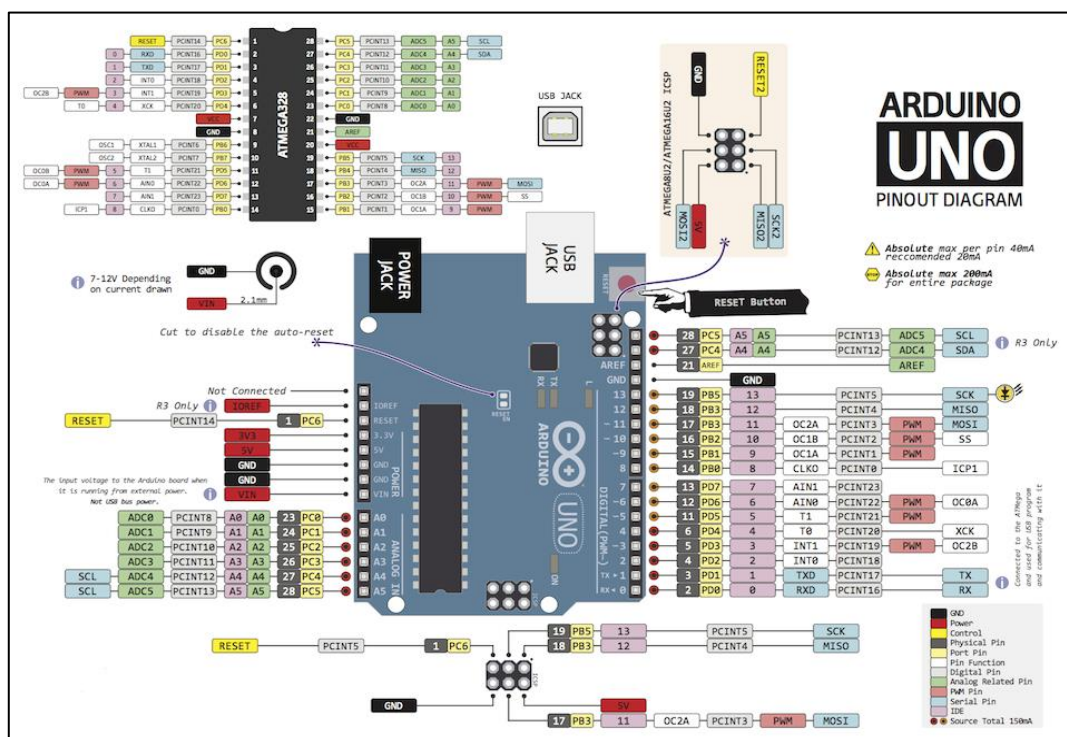


Figura 18 Estructura interna de un Arduino Uno

Fuente: (García, 2016)

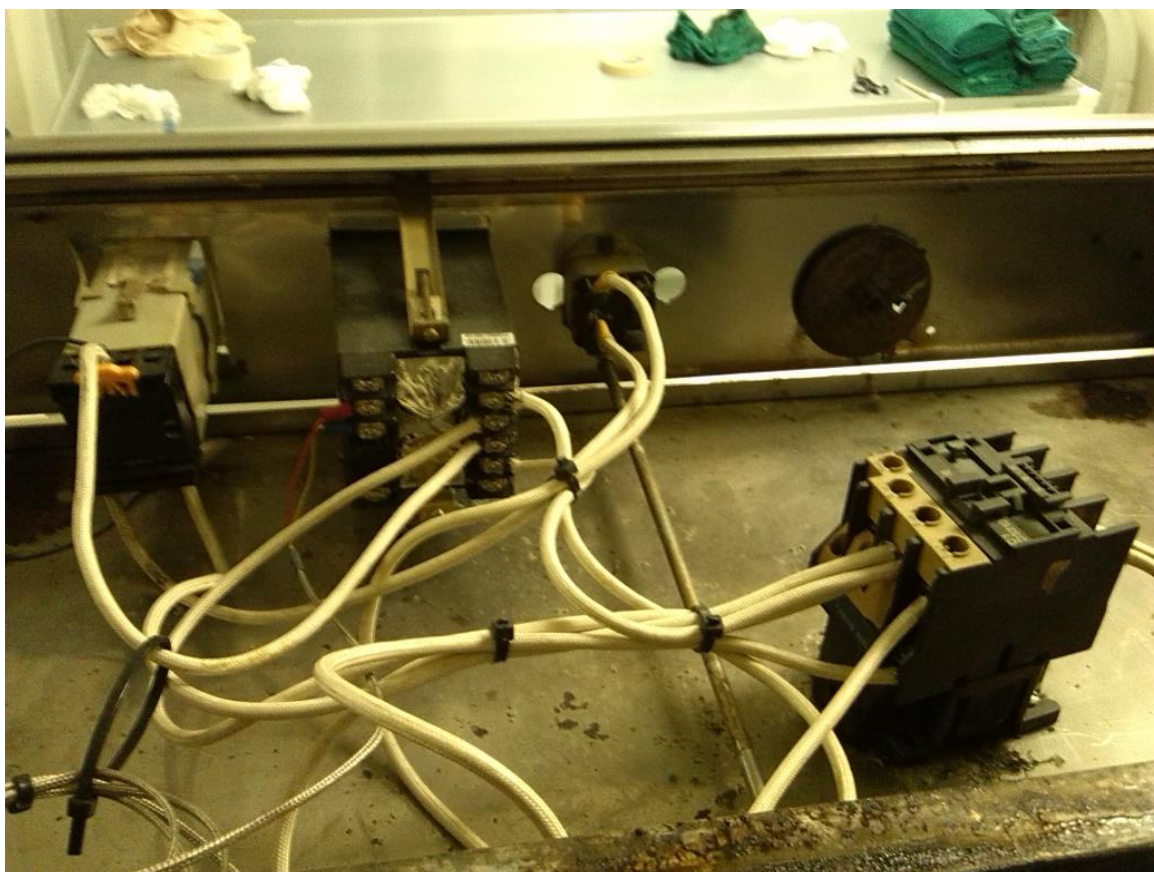
## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

#### 3.1. Previo a la implementación

La esterilizadora presenta las siguientes falencias: ciclos y temperatura de esterilización manuales no confiables, fuga de calor debido al deterioro del selle en la puerta, daño del material sujeto al proceso de esterilización, estos inconvenientes y el tiempo empleado solo en esta actividad, provocan malestar en el usuario.

Lo que se puede observar en las figura 19 a 22.



**Figura 19 Ciclo manual y Automático Obsoleto**



**Figura 20 Visualizador y temporizador deteriorado**



**Figura 21 Fugas por selle de puerta deformado**



**Figura 22 Daño del material en el proceso de esterilización**

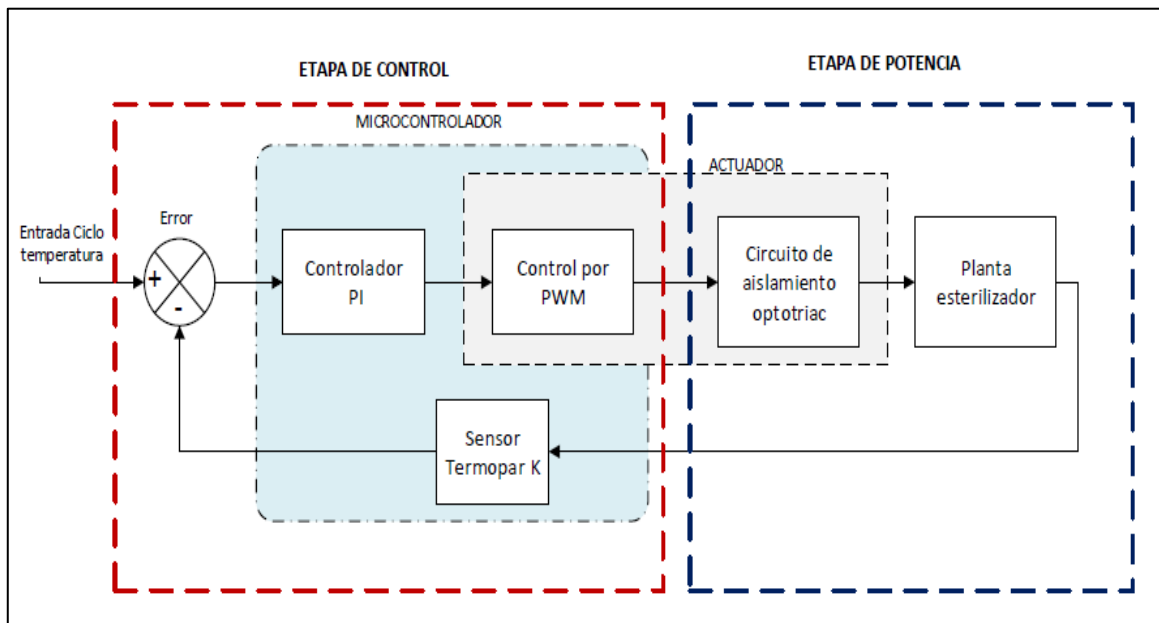
### **3.2. Características y componentes de la planta**

En la Figura 23 se describe el diagrama de bloques que conforma el sistema de control de la esterilizadora. Constituida por dos etapas: control y potencia.

La etapa de control se desenvuelve en un microcontrolador Arduino Uno, en el cual se desarrolla los algoritmos para el controlador PI y el control PWM, proporcional a la señal del controlador, adicionalmente el tratamiento de la señal dada por el sensor.

La etapa de potencia está integrada por un módulo actuador y la planta propiamente. Para el accionamiento del actuador, este requiere recibir la señal PWM desde el

controlador, inmediatamente se logra controlar la cantidad de potencia suministrada a la resistencia de cerámica que posee la esterilizadora, lo cual provoca la salida de temperatura que será censada y a la vez realimenta la señal de entrada lo que permite realizar los cálculos de error y corregir en caso de necesitarlo.



**Figura 23 Diagrama de bloques del sistema de control de la planta**

El sensor de temperatura está ubicado en la cámara interna de la esterilizadora, se ha elegido una Termopar tipo K, que en conjunto con los circuitos de acondicionamiento, se obtendrá la temperatura medida, que es la salida del sistema.

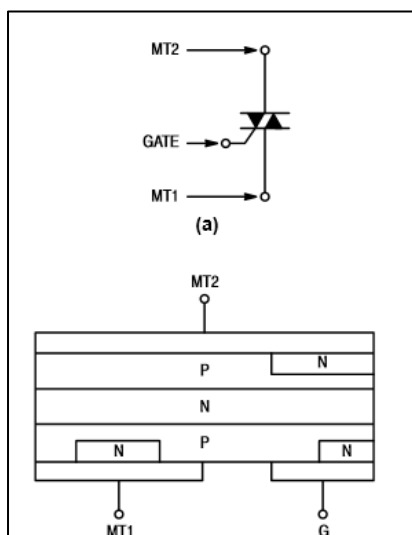
### 3.2.1. Diseño del actuador

En esta etapa se requiere controlar de cantidad de potencia suministrada a la resistencia de cerámica, para lo cual el control se lo realizó mediante una señal PWM proporcional a la señal generada por el controlador PI. Efectuando un recorte de la onda de voltaje de corriente alterna.

Este recorte de la onda se realizó para cada semiciclo de la onda de voltaje utilizando un triac. El triac puede conducir en cualquier dirección una vez que se excede su voltaje de transición conductiva. (Chapman, 2000)



Para hacer el recorte efectivo de la onda se envía una corriente a la compuerta de triac en el momento hasta que el voltaje del triac sea menor que su voltaje de transición conductiva. El disparo del triac se lo realiza desde el Arduino, en su salida analógica 6, En la figura 24 se puede observar la estructura básica de un triac.

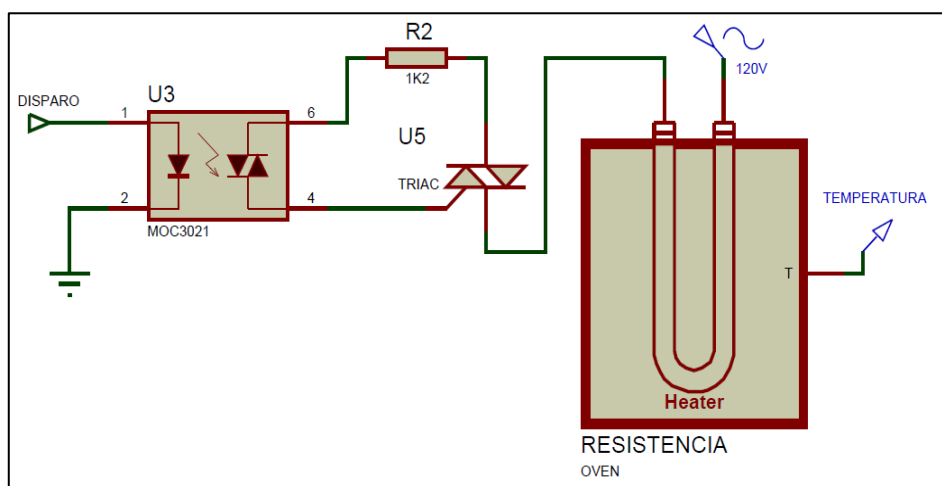


**Figura 24 Estructura de un triac**

Fuente: (Chapman, 2000)

El circuito mostrado en la Figura 25, permite el control de fase directa donde el triac maneja el voltaje sobre la Resistencia de cerámica, a través del optotriac.

, En la tabla 6 se describen las características de triac, para realizar los siguientes cálculos.



**Figura 25 Circuito De Disparo**

**Tabla 6****Características de MOC3021**

<b>Características</b>	
Voltaje de aislamiento	7500V
Tensión del diodo inverso de entrada	3V
Potencia total disipada	330mW
Corriente Diodo de entrada en $I_{AC}$ , $I_{DC}$	50mA
Corriente del optotriac	100mA
$I_{GT}$ máxima	15mA

Fuente: (Texas Instruments Incorporated, 1995)

**3.2.2. Características y acondicionamiento de señal de los sensores**

En esta etapa del diseño es muy importante ya que la esterilizadora funcionará adecuadamente solo si las temperaturas están en los valores establecidos. En esta etapa se describirá el hardware que se empleó en el desarrollo del proyecto.

**3.2.2.1. Termopar Tipo K**

Para el proyecto se eligió un termopar tipo K, ya que normalmente se utiliza en hornos y procesos térmicos, debido a su capacidad de resistir temperaturas altas, hasta una temperatura de 580°C y puede ser usadas de forma continua en atmosferas oxidantes

La composición de un termopar tipo K se describe en la tabla 7.

**Tabla 7****Composición termopar tipo K**

<b>Junta +</b>	<b>Junta -</b>
NiCr: cromo-níquel	NiAl: aluminio-níquel(magnético)

La medición de temperatura del termopar se utiliza conjuntamente con el módulo acondicionador de señal AD595. La temperatura es medida por la exposición del termopar a la superficie que genera calor. Las principales características del termopar se destacan en la tabla 8:

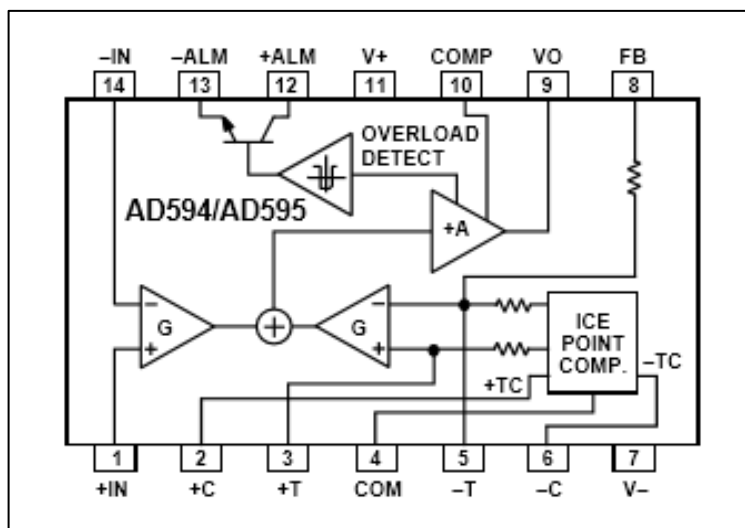
**Tabla 8**

**Características termopar tipo K**

<b>Rango de medida</b>	-180°C A 580°C
<b>Máximo de entrada</b>	60Vdc, 24Vac
<b>Voltaje de salida</b>	1mV por °C de variación de temperatura

**3.2.3. Acondicionamiento de señal para termopar tipo K con AD595**

El circuito integrado AD595 es específico para Termopar, como se describe en la Figura 26. Este contiene un amplificador de instrumentación y el circuito de compensación de unión fría para un termopar tipo K, aunque se podría calibrar para otros tipos de termopares. (Analog Devices Inc, 1999)



**Figura 26 Esquema de Bloques AD595**

Fuente: (Analog Devices Inc, 1999)

El circuito integrado introduce una compensación en la entrada del amplificador de  $11 \mu\text{V}$ , por tanto el voltaje exacto de salida para para  $25^\circ\text{C}$  es:

$$AD595_{OUTPUT} = (V_{TERMOCUPLA} + 11\mu\text{V}) \times 247.3$$

Se debe tener en cuenta que el comportamiento del termopar no es lineal, por lo que se debe emplear el factor de sensibilidad apropiado en cada caso. En la tabla 8 se describe los datos dados por el fabricante. Cuyas hojas técnicas se encuentran en el Anexo II.

**Tabla 9**

**Datos dados por la hoja técnica AD595**

<b>Calibración Temperatura</b>	$25^\circ\text{C}$
<b>Sensibilidad (a <math>25^\circ\text{C}</math>)</b>	$40,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
<b>Ganancia ( a <math>25^\circ\text{C}</math>)</b>	247,3
<b>Voltaje salida ( a <math>25^\circ\text{C}</math>)</b>	$10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

En la tabla 9 se muestra el voltaje de salida del circuito integrado AD595 para diferentes temperaturas, estos valores se toman de las hojas de datos del fabricantes.

Se coloca estos datos y se aplica un método numérico de aproximación y desviación de errores en Microsoft Excel de lo cual se obtiene la ecuación lineal, con un error cometido despreciable

Esta ecuación caracteriza el comportamiento del sistema termopar con AD595

*Siendo :*

$T_{TERMOCUPLA}$  : temperatura que desea medir( $^\circ\text{C}$ )

$V_{AD595}$  : voltaje salida del AD595(mV)

En la figura 27, se observa la respuesta de voltaje de salida de un AD595, donde se aprecia su comportamiento proporcional lineal.

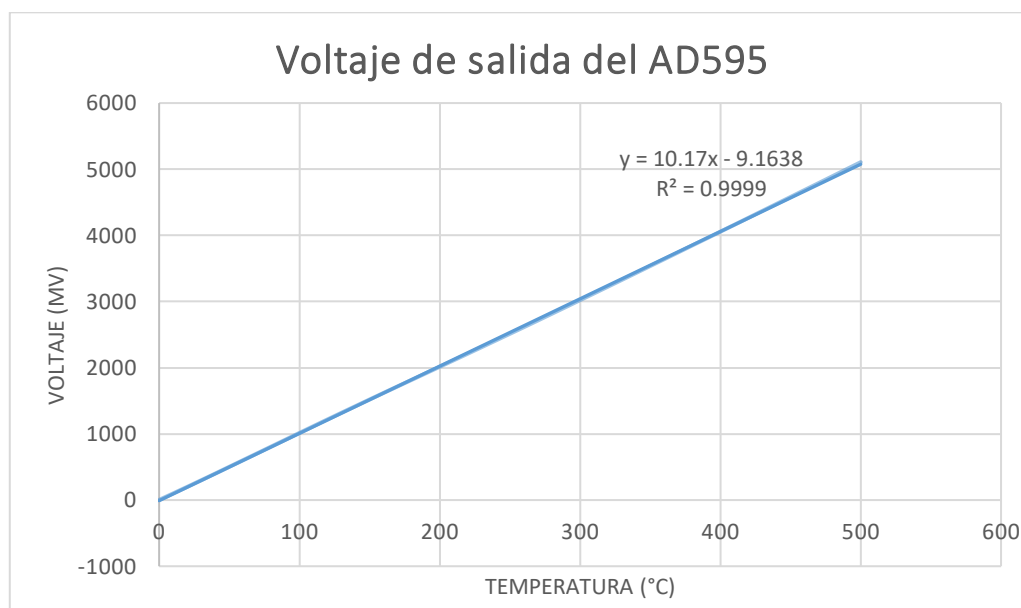
Los filtros RC pasa bajos se utilizan para mejora la adquisición de datos y evitar errores debido al ruido. En la figura 28 se muestra el circuito implantado para AD595 junto al termopar tipo k.

**Tabla 10**

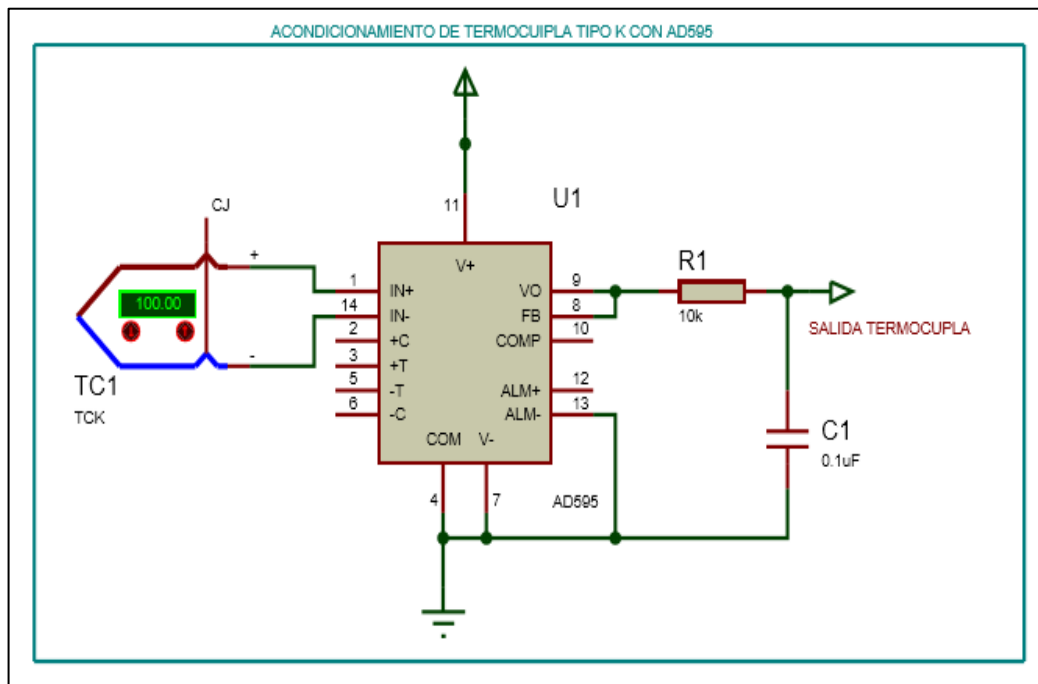
**Voltaje de operación circuito integrado AD595**

<b>TEMPERATURA TERMOPAR °C</b>	0	10	20	25	30	40	50	60	80
<b>SALIDA AD595 (mV)</b>	2.7	101	200	250	300	401	503	605	810
<b>TEMPERATURA TERMOPAR °C</b>	100	120	140	160	180	200	220	240	260
<b>SALIDA AD595 (mV)</b>	1015	1219	1420	1620	1817	2015	2213	2413	2614
<b>TEMPERATURA TERMOPAR °C</b>	280	300	320	340	360	380	400	420	440
<b>SALIDA AD595 (mV)</b>	2817	3022	3227	3434	3641	3849	4057	4266	4476

Fuente: (*Analog Devices Inc, 1999*)



**Figura 27 Comportamiento de voltaje de salida del AD595**



**Figura 28 Circuito de acondicionamiento de termopar con Ad595**

### 3.2.4. Fuente De Tensión Eléctrica

La tarjeta final, requiere de fuentes de tensión de 110Vac, 12V<sub>dc</sub>, 5 V<sub>dc</sub>, de esta manera se realizó la siguiente distribución:

- Para alimentar la resistencia de cerámica se requiere de tensión de corriente alterna a 110Vac, el mismo que es suministrado por la red eléctrica.
- Para alimentar componentes en otras etapas será utilizada 12V como entrada, de este modo se empleó un puente rectificador alimentado por la salida del mismo transformador (120/12) V<sub>AC</sub>. A la salida de este rectificador se ubica un diodo de permite la carga un condensador de 200µF hasta adquirir la tensión pico del rectificador, seguidamente se sitúa un regulador lineal LM7812 para mantener el tensión constante.
- Para alimentar el amplificador de señal AD595 del termopar, se requirió una tensión de corriente continua de 5V<sub>dc</sub>, para lo cual se empleó un LM7805.

En la figura 29 se muestra el circuito para crear el conjunto de fuentes para la alimentación de cada etapa del circuito final.

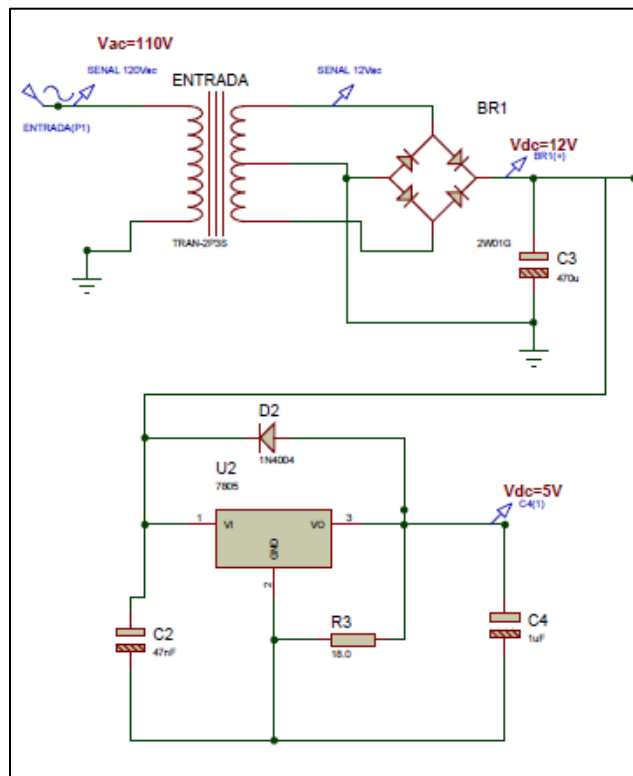


Figura 29 Fuente de alimentación eléctrica

### 3.2.5. Circuito para LCD

Para visualizar los valores de seteo temperatura y de temperatura medida, se empleó un módulo de LCD, como se muestra en la figura 35.

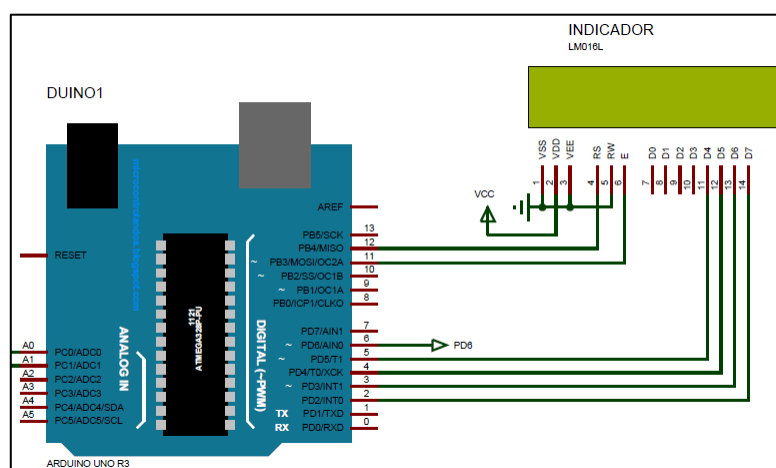


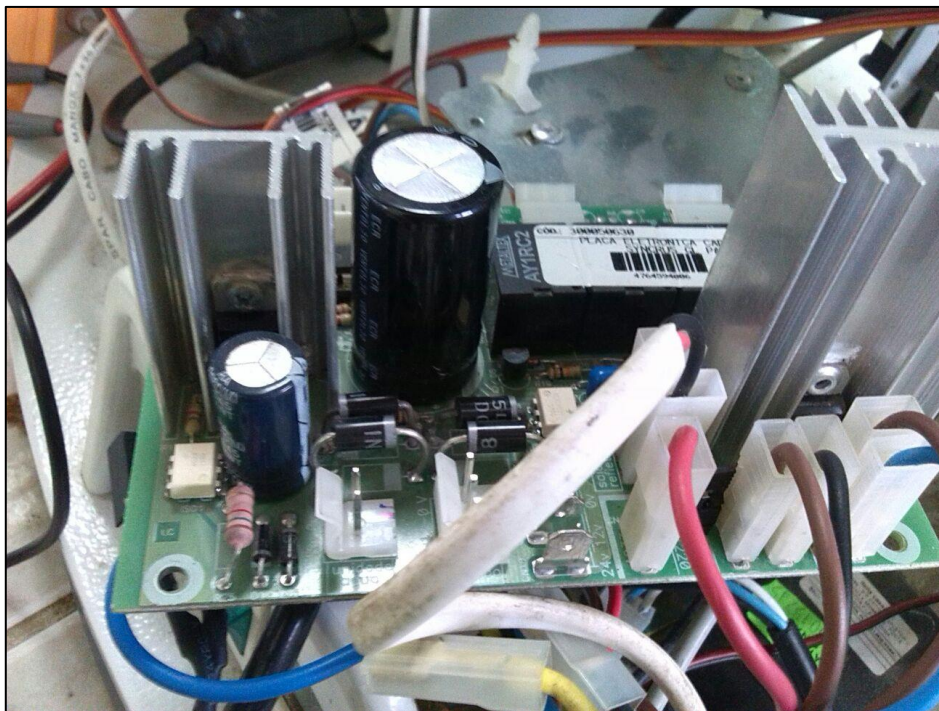
Figura 30 Circuito para LCD

### 3.2.6. Circuito Final

En el anexo III, se puede observar el circuito final, implementado para el control automático de la esterilizadora-

### 3.3. Implementación de hardware

En la figura 31 se muestra la tarjeta de control implementada basada en el circuito final expuesto en el anexo III

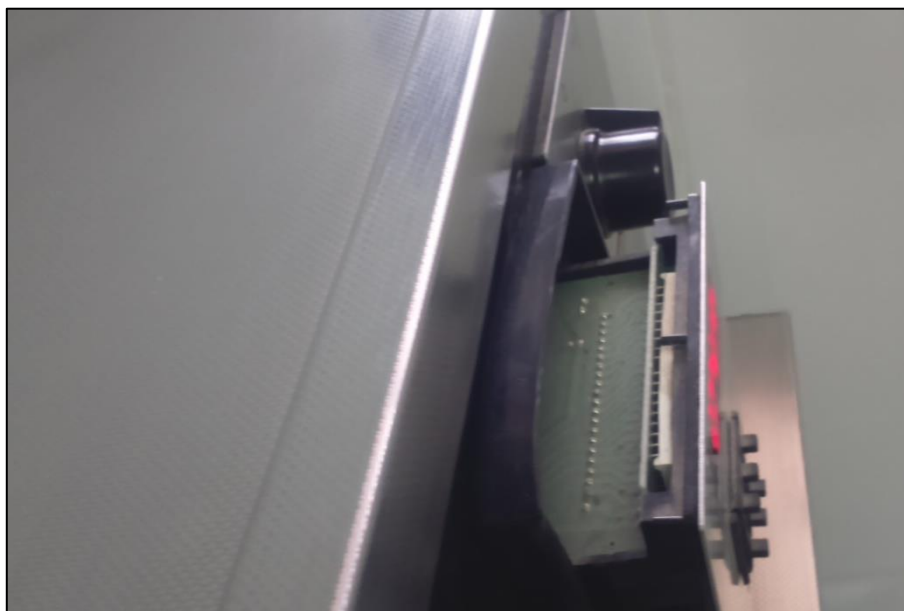


**Figura 31 Tarjeta de control**

Se realizó la instalación de un nuevo panel de control, en cual el operario puede elegir el ciclo de esterilización, según el material que necesite el proceso de esterilización, normalmente se trabaja en el modo automático, sin embargo también se puede elegir modo manual, según la necesitada del usuario. En las figura 32 a 34 se muestra el panel instalado y las pruebas de funcionamiento.

Se realizó pruebas de funcionamiento en conjunto con el personal de enfermería.





**Figura 32 Panel de control**



**Figura 33 Pruebas de funcionamiento**



**Figura 34 Instalación final del panel de control**

### **3.4. Diseño del controlador**

Terminado la construcción de todos los módulos necesarios para el funcionamiento de este proyecto, el siguiente paso es la interpretación de datos adquiridos. La dinámica de la planta generada, mantiene una respuesta lenta lo cual incrementa el tiempo de adquisición de datos.

En base a los datos recolectados se obtiene la función de transferencia de la planta, para el dimensionamiento de los parámetros PI. El objetivo del controlador es justamente es mantener la temperatura de salida conforme al Set Point definido por el usuario, por lo cual se estableció un estudio en régimen permanente.

Para la identificación de la planta, se desarrolló una identificación clásica, utilizando el escalón como señal de prueba y las reglas de Ziegler-Nichols

#### **3.4.1. Descripción de la planta**

La planta está compuesta por un esterilizador eléctrico de entrada alterna monofásica que funciona por calentamiento de una resistencia térmica ubicada en el interior de las paredes de la cabina. Como sensor de la variable de proceso se utilizó un termopar tipo K, descrito en la sección 3.3.1. Este termopar toma el valor de la temperatura desde un punto central dentro del equipo y los datos son posteriormente adquiridos a través de la entrada analógica del Arduino Uno, posteriormente se analizan y grafican los datos en Matlab.

### 3.4.2. Obtención del modelo matemático

Para la elaboración del modelo matemático de esta planta, se optó por un enfoque experimental para la sintonización del controlador, en este caso, para un controlador PI. Para lo cual acudimos a la aplicación de la reglas de Ziegler y Nichols para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer los parámetros  $K_p$ ,  $i T$  y  $d T$ ) con base en las respuestas escalón experimentales.

Siendo este método muy convenientes cuando no se conocen la dinámica y modelos matemáticos de las plantas.

### 3.4.3. Caracterización del proceso

Se caracteriza al proceso mediante un modelo simple de primer orden con tiempo de retardo o tiempo muerto. Este sistema térmico, tiene una respuesta monótona creciente, sin oscilaciones, su comportamiento se asemeja a un sistema de primer orden. El modelo que se empleará para caracterizar el proceso es el siguiente:

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$$

En este modelo el proceso se caracteriza mediante tres parámetros: La ganancia  $K$ , el tiempo muerto o de retardo  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$ . Seguidamente se realizó pruebas dinámicas en el sistema real, al introducir una entrada escalón.

### 3.4.4. Adquisición de datos

Para este procedimiento se empleó la tarjeta Arduino Uno, ya que esta puede comunicarse con otros dispositivos mediante protocolo UART, ya que tiene incorporado un circuito que convierte los datos enviados por protocolo UART a protocolo RS232, esto lo hace emulando un puerto serial en la PC al cual se conecta la tarjeta.

Así los datos serán obtenidos por medio de uno de los canales análogos de arduino (A0), cuya entrada analógica soporta 10 bits o 1024 valores y trabaja a 5V. Se envían por protocolo serial a la PC, después de este proceso en el software Matlab establecerá la conexión con dicho puerto serial virtual para recibir los datos y por último se procede a graficar los datos recibidos.

Lo primero que se efectuó es el código de programación de Arduino considerando:

- La configuración de la comunicación serial.
- Especificar el canal analógico del arduino que procesará el dato
- Enviar el dato por protocolo serial.
- Establecer la velocidad de muestreo y un retardo de ser necesario en el programa.

En la figura 35 se detalla las líneas de programación realizado en el sketch para lectura y envío de datos del sensor.

```

////////////////////////////////////
// ADC-Serial Lee un voltaje analógico ingresado por los puertos A0
// y lo convierte en un Valor digital, luego envía este valor por el puerto serial //emulado por Arduino
////////////////////////////////////
//Variable que almacena los datos
int valorADC=0;
void setup()
{
//Inicialización y configuración del protocolo serial (Velocidad= 9600 baudios)
Serial.begin (9600);
}
Void loop ()
{
//Se toma el dato del canal analógico A0 y se guarda en la variable valor ADC
ValorADC = analogRead(A0);
//Se envía el dato por protocolo serial del valor guardado en valor ADC
Serial.println(valorADC);
// Retardo
delay(25);}

```

**Figura 35 Programa con el cual se lee los datos en puerto analógico**

Fuente (*Cuadros Acosta, 2015*)

Para continuar, se realizó el programa en Matlab que consta de una función que recibe el número de muestras que el programa va a tomar para hacer la gráfica. Esta función fue llamada desde el Command Windows de Matlab. En la figura 36 se detalla las líneas de programación que generan el ciclo con el cual se van a ir tomando una a una las muestras enviadas por el arduino, además de eso se hace la conversión del valor entregado por el ADC de arduino a un valor de temperatura y por último se realiza la respectiva gráfica. De esta forma en Matlab se almacena en el Workspace la variable Temperatura, con los valores que se tomó por el puerto serial enviados por el convertidor analógico digital del arduino.

Datos experimentales se recabaron del proceso de caracterización de la planta frente a un cambio en la entrada ante un escalón, Se generó 250 muestras en el tiempo como se muestra en la tabla 11, para el análisis posterior del comportamiento de la planta.

```

function Temperatura=ADC_Serial2(muestras)
close all;           %Cierra todo lo que Matlab tenga abierto
clc;                %limpiar la pantalla
Temperatura=0;     %Declara variable en la cual se van a guardar
delete(instrfind({'port'},{'COM4'})); %borrar puerto serial
abierto
puerto=serial('COM4');           %crea puerto serial com4
puerto.BaudRate=9600;           %Establecer velocidad de
transmisión
fopen(puerto);                   %abre el puerto a utilizar
contador=1;
%configura la ventana donde se va a mostrar la grafica
figure('Name','Grafica Planta de Temperatura');%Nombre de la
ventana
title('GRAFICA TEMPERATURA VS. TIEMPO');           %Titulo de la
gráfica
xlabel('TIEMPO (min)');           %Leyenda del eje
x
ylabel('TEMPERATURA (°C)');       %Leyenda del eje
y
grid on;                         %Apagar uadrícula
hold on;
%Ciclo de captura de valores e ir realizando la gráfica paso a
paso
while contador<=muestras
    ylim([0 200]);
    xlim([0 muestras]);
    %Toma el valor recibido por el puerto y lo guarda en la variable
    valorADC=fscanf(puerto,'%f');
    %Hace la conversión a temperatura
    Temperatura(contador)=(200*(valorADC(1)-55.55))/1023;
    contador=contador+1;
    plot(temperatura) %Grafica de las dos señales
end
%cierra y borra el puerto utilizado, borra todas las variables
utilizadas
fclose(puerto);
delete(puerto);
%%
end

```

**Figura 36 Programa con el cual se realiza la comunicación Arduino Matlab**

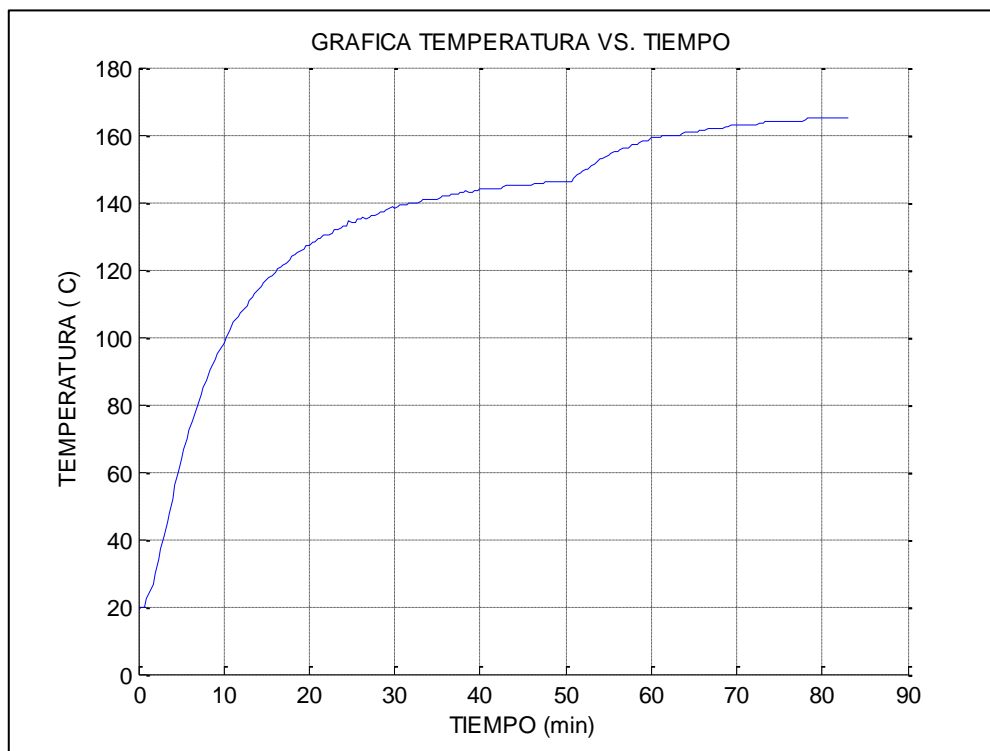
Fuente (Cuadros Acosta, 2015)

Tabla 11

## Datos experimentales de la planta frente a una entrada escalón

No.	TIEMPO [min]	TEMP [°C]	No.	TIEMPO [min]	TEMP [°C]	No.	TIEMPO [min]	TEMP [°C]	No.	TIEMPO [min]	TEMP [°C]	No.	TIEMPO [min]	TEMP [°C]
1	0.00	19.00	51	16.99	121.20	101	33.53	140.33	151	50.33	146.33	201	66.86	162.14
2	0.53	19.64	52	17.14	121.83	102	33.80	140.70	152	50.53	146.33	202	67.33	162.14
3	0.99	20.20	53	17.53	122.14	103	34.33	141.14	153	50.99	146.33	203	67.47	162.20
4	1.14	22.33	54	17.99	123.20	104	34.53	141.20	154	51.14	147.33	204	67.99	162.20
5	1.53	24.14	55	18.14	124.33	105	34.99	141.33	155	51.53	148.14	205	68.20	162.33
6	1.99	26.70	56	18.53	124.64	106	35.14	141.33	156	51.99	148.70	206	68.53	162.33
7	2.14	30.33	57	18.99	125.20	107	35.47	141.64	157	52.14	149.33	207	68.99	162.70
8	2.53	33.64	58	19.14	125.83	108	35.86	142.14	158	52.53	150.14	208	69.14	162.83
9	2.99	37.20	59	19.53	126.14	109	36.33	142.20	159	52.99	150.20	209	69.47	163.14
10	3.14	41.33	60	19.99	127.20	110	36.53	142.20	160	53.14	151.33	210	69.86	163.14
11	3.53	45.14	61	20.14	127.33	111	36.99	142.33	161	53.53	151.64	211	70.33	163.14
12	3.99	48.20	62	20.53	128.14	112	37.14	142.33	162	53.80	152.20	212	70.47	163.14
13	4.14	52.33	63	20.99	128.20	113	37.47	142.64	163	54.20	153.14	213	70.86	163.20
14	4.53	56.14	64	21.14	129.14	114	37.86	143.14	164	54.66	153.33	214	71.33	163.20
15	4.99	60.20	65	21.53	129.33	115	38.33	143.20	165	54.99	153.70	215	71.47	163.20
16	5.14	63.33	66	21.99	130.20	116	38.53	143.20	166	55.14	154.33	216	71.99	163.33
17	5.53	66.14	67	22.14	130.33	117	38.99	143.33	167	55.53	154.64	217	72.20	163.33
18	5.99	69.70	68	22.53	131.14	118	39.14	143.33	168	55.99	155.20	218	72.53	163.33
19	6.14	72.83	69	22.99	131.20	119	39.53	143.64	169	56.14	155.33	219	72.99	163.70
20	6.53	75.14	70	23.14	132.14	120	39.80	143.70	170	56.47	155.64	220	73.14	163.83
21	6.99	78.20	71	23.53	132.44	121	40.33	144.14	171	56.99	156.14	221	73.47	164.14
22	7.14	80.83	72	23.99	132.70	122	40.47	144.14	172	57.14	156.20	222	73.86	164.14
23	7.53	83.14	73	24.14	133.14	123	40.86	144.14	173	57.53	156.33	223	74.33	164.14
24	7.99	85.20	74	24.47	133.33	124	41.33	144.20	174	57.99	157.14	224	74.47	164.14
25	8.14	87.33	75	24.99	134.14	125	41.47	144.20	175	58.20	157.20	225	74.86	164.14
26	8.53	89.64	76	25.14	134.20	126	41.99	144.33	176	58.53	157.33	226	75.33	164.20
27	8.99	91.70	77	25.53	134.33	127	42.20	144.33	177	58.80	157.70	227	75.47	164.20
28	9.14	93.83	78	25.86	135.14	128	42.53	144.33	178	59.14	158.14	228	75.86	164.20
29	9.53	95.14	79	26.33	135.20	129	42.80	144.70	179	59.53	158.20	229	76.33	164.20
30	9.99	97.20	80	26.53	135.20	130	43.33	145.14	180	59.99	158.33	230	76.47	164.20
31	10.14	98.33	81	26.99	135.33	131	43.47	145.14	181	60.33	159.14	231	76.86	164.33
32	10.53	100.14	82	27.14	135.83	132	43.86	145.14	182	60.53	159.20	232	77.33	164.33
33	10.99	102.20	83	27.53	136.14	133	44.33	145.20	183	60.99	159.33	233	77.53	164.33
34	11.14	103.33	84	27.99	136.20	134	44.47	145.20	184	61.14	159.33	234	77.99	164.33
35	11.53	105.14	85	28.14	136.83	135	44.86	145.20	185	61.47	159.64	235	78.14	164.83
36	11.99	106.20	86	28.53	137.14	136	45.33	145.33	186	61.86	160.14	236	78.47	165.14
37	12.14	107.33	87	28.99	137.20	137	45.53	145.33	187	62.33	160.14	237	78.86	165.14
38	12.53	108.14	88	29.14	137.83	138	45.99	145.33	188	62.47	160.20	238	79.33	165.14
39	12.99	110.20	89	29.53	138.14	139	46.14	145.33	189	62.99	160.20	239	79.47	165.14
40	13.14	111.33	90	29.99	138.20	140	46.47	145.64	190	63.20	160.33	240	79.86	165.14
41	13.53	112.14	91	30.14	138.33	141	46.99	145.64	191	63.53	160.33	241	80.33	165.20
42	13.99	113.20	92	30.47	138.64	142	47.14	145.70	192	63.80	160.70	242	80.47	165.20
43	14.14	114.33	93	30.99	139.14	143	47.53	145.83	193	64.33	161.14	243	80.86	165.20
44	14.53	115.14	94	31.20	139.20	144	47.86	146.14	194	64.47	161.14	244	81.33	165.20
45	14.99	116.20	95	31.53	139.33	145	48.33	146.14	195	64.99	161.20	245	81.47	165.20
46	15.14	117.33	96	31.99	139.70	146	48.47	146.14	196	65.14	161.33	246	81.86	165.33
47	15.53	117.64	97	32.14	139.83	147	48.86	146.20	197	65.53	161.33	247	82.33	165.33
48	15.99	118.20	98	32.47	140.14	148	49.33	146.20	198	65.99	161.64	248	82.53	165.33
49	16.14	119.33	99	32.99	140.14	149	49.47	146.20	199	66.14	161.70	249	82.99	165.33
50	16.53	120.14	100	33.20	140.20	150	49.86	146.20	200	66.53	161.83	250	83.00	165.33

En la figura 37 se presenta la curva de reacción de la planta, obtenida de los datos de la tabla 11, a través de la salida del controlador en lazo abierto.



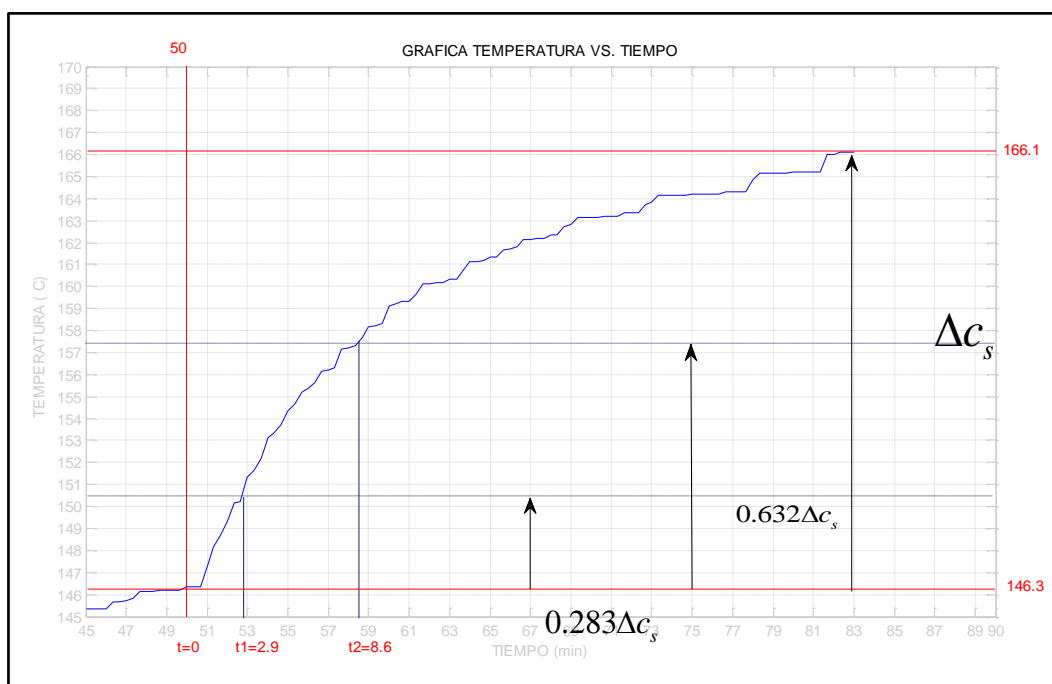
**Figura 37 Curva de reacción del proceso**

### 3.4.5. Obtención experimental del modelo matemático de la planta

Cabe mencionar que para el análisis se consideró un cambio de ejes de referencia, puesto que se dejó que el proceso alcance un estado de equilibrio previo y luego sufra un cambio por el escalón en la señal de salida del controlador en lazo abierto el 25% al 30% como se observa en la gráfica 37, adicionalmente describe en la tabla 12, los datos de los nuevos ejes de referencia, como se muestra en la figura 38.

**Tabla 12**  
**Datos de la cursa de reacción, ejes de referencia**

<b>Eje X</b>	Tiempo que cambio en la respuesta del controlador en lazo abierto	t=50 [min]
<b>Eje Y</b>	Temperatura que cambio en la respuesta del controlador en lazo abierto	Temp=1 46.3[°C]



**Figura 38** Parámetros de la planta mediante el método de Ziegler-Nichols

De la figura 38 se obtiene, el término  $\Delta c$  es la perturbación o cambio de salida de la variable de proceso respecto a su valor inicial, aplicando la ecuación (2.7), se calcula  $t_1$  el tiempo en el que la curva adquiere el 28.3%, aplicando la ecuación (2.18), también se obtiene el  $t_2$  tiempo en el que la curva adquiere el 63.2% aplicando la ecuación (2.19).

$$\Delta c(t) = c(t) - c(0) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$\Delta c_s = (166.1[^\circ\text{C}] - 146.3[^\circ\text{C}]) = 19.8[^\circ\text{C}]$$

Sustituyendo

$$t_1 = \text{tiempo en el cual } \Delta c = 0.283\Delta c_s \dots \dots \dots (2.18)$$

$$c(t_1) = 0.283\Delta c_s$$

$$c(t_1) = 0.283(19.8[^\circ\text{C}]) = 5.6[^\circ\text{C}]$$

$$t_2 = \text{tiempo en el cual } \Delta c = 0.632\Delta c_s \dots \dots \dots (2.19)$$

$$c(t_2) = 0.632\Delta c_s$$

$$c(t_2) = 0.632(19.8[^\circ\text{C}]) = 12.5[^\circ\text{C}]$$



*Datos de la gráfica :*

$$t_1 = (t_{\text{grafico}} - t_{\text{eje ref}}) = (52.90 - 50) = 2.90[\text{min}]$$

$$t_2 = (t_{\text{grafico}} - t_{\text{eje ref}}) = (58.66 - 50) = 8.66[\text{min}]$$

*Sustituyendo se obtiene :*

Constante de tiempo

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \dots \dots \dots (2.16)$$

$$\tau = \frac{3}{2}(8.66[\text{min}] - 2.90[\text{min}]) = 8.55[\text{min}]$$

*Tiempo muerto*

$$t_0 = t_2 - \tau \dots \dots \dots (2.17)$$

$$t_0 = 8.66[\text{min}] - 8.55 = 0.05[\text{min}]$$

Cálculo de la ganancia estática del proceso

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta u} \dots \dots \dots (2.9)$$

*Donde  $\Delta u$  es la Función escalón*

$$K = \frac{\Delta c}{\Delta u} = \frac{\Delta c[^\circ\text{C}]}{\Delta CO[\%]} = \frac{19.8}{30 - 25} = 3.96 \left[ \frac{^\circ\text{C}}{\%} \right]$$

Sustituyendo en la FT de primer orden con retardo :

$$G(s) = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$$

*Se obtiene FT. de la planta :*

$$G(s) = \frac{3.96 e^{-0.05s}}{8.55s + 1}$$

Existe muchas formas de aproximar  $e^{-t_0 s}$  por una función racional, en este caso se utilizó una aproximación de Padé, de donde se obtiene:

*FT. con aproximación Padé*

$$G(s) = \frac{K(2 - t_0 s)}{(\tau s + 1)(2 + t_0 s)} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$G(s) = \frac{3.96(2 - 0.05s)}{(8.55s + 1)(2 + 0.05s)}$$

*F.T. Expresada en polinomial*

$$G(s) = \frac{K(2 - t_0 s)}{t_0 \tau s^2 + (t_0 + 2\tau)s + 1} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$G(s) = \frac{3.96(2 - 0.05s)}{0.43s^2 + 17.15s + 1}$$

### 3.5. Sintonización del controlador

Finalmente como resultado se tiene la caracterización de la planta expresada de forma teórica a través de las funciones de transferencia:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{F.T. de primer orden con retardo} \\ \\ G(s) = \frac{3.96e^{-0.05s}}{8.55s + 1} \\ \\ \text{F.T. con aproximación de Padé} \\ \\ G(s) = \frac{3.96(2 - 0.05s)}{(8.55s + 1)(2 + 0.05s)} \\ \\ \text{Expresión polinomial} \\ \\ G(s) = \frac{7.923 - 0.198s}{0.43s^2 + 17.15s + 1} \end{array} \right.$$

Para obtener los parámetros del controlador PI, se aplicó el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols, a continuación se detalla el proceso.

Primero se verificó que la curva de respuesta de la función debe tener forma de S, con un punto de inflexión y se obtuvo esta gráfica en Matlab utilizando las líneas de código de la figura 39.

Como se observa en la figura 40, la respuesta de la función  $G(s)$  cumple con la característica buscada. Para determinar el punto de inflexión de la curva con forma de “S” se deriva la función de transferencia a la cual le aplicamos un escalón unitario. El punto de

inflexión es un cambio que ocurre en el sistema en este caso el punto más alto que se obtiene al derivar la unción de transferencia y que nos indica que hay un cambio en nuestra gráfica, lo cual se presenta en la figura 41.

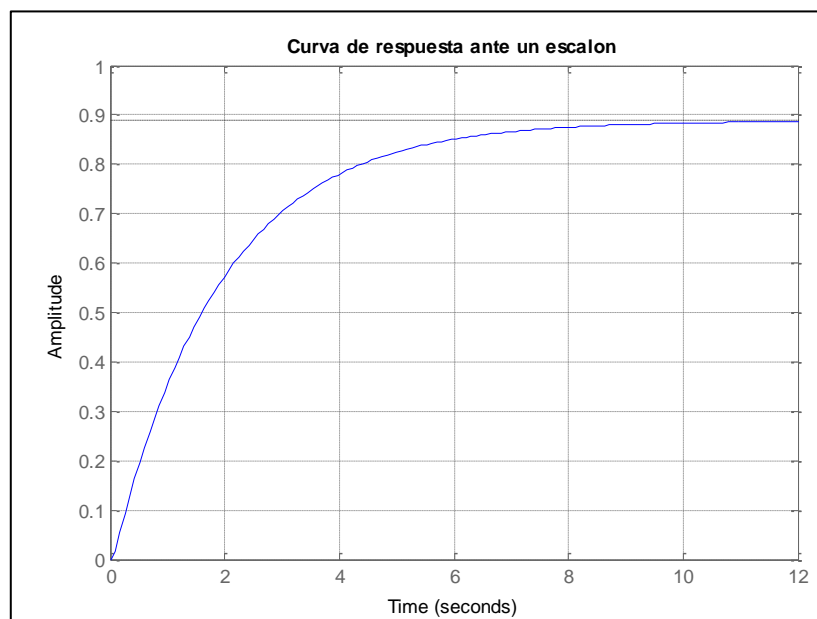
```

clc
clear all;
% FT. de la planta
%
%      -0.198 s + 7.923
% G(s)=-----
%      0.43 s^2 + 17.15 s + 1

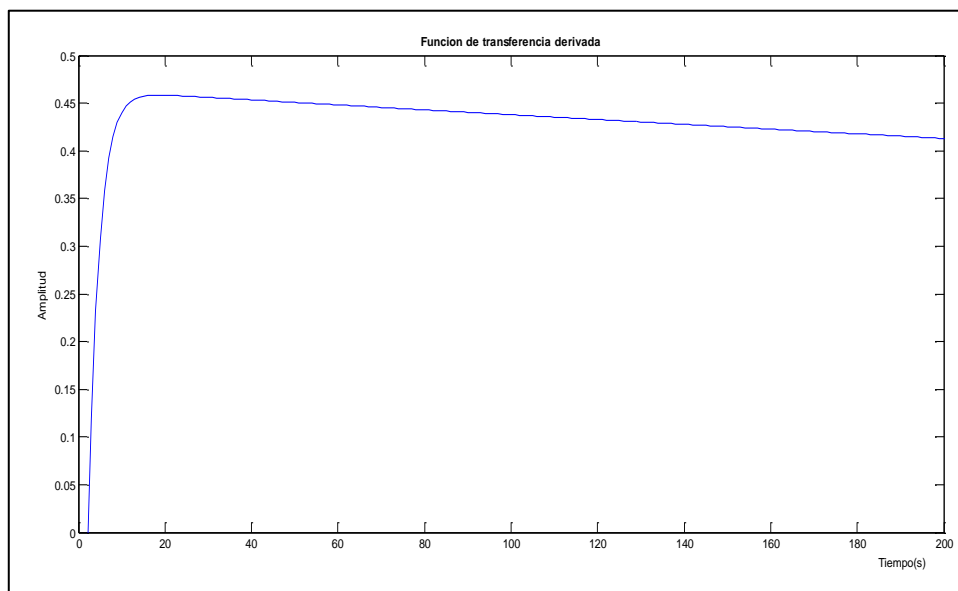
%funcion de transferencia G(s)
G=tf([-0.198 7.923],[0.43 17.15 1])
step(G)
sisotool(G)
hold on
%derivada para obtener pto inflexión
dt=0.01;
t=0:dt:8;
y=step(G,t);
dy=diff(y)/dt;
%m=valor maximo, p=ubicación de punto
[m,p]=max(dy)
plot(dy)
title('Funcion de transferencia derivada')

```

**Figura 39** Algoritmo para la Gráfica de respuesta de la planta con entrada escalón



**Figura 40** Curva de respuesta de la de la planta ante un escalón



**Figura 41** *Función de transferencia derivada*

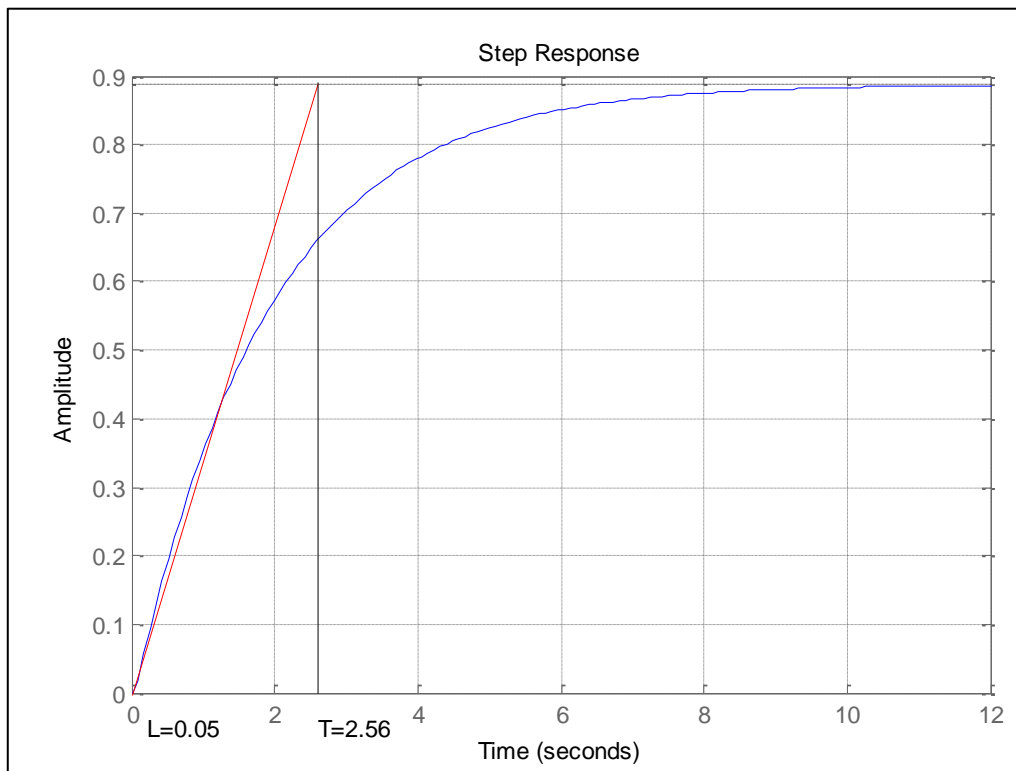
El punto de inflexión encontrado es  $m = 0.4584$  y  $p = 19$

Ahora para determinar los parámetros de tiempo de retardo ( $L$ ) y constante de tiempo ( $T$ ), para lo cual a través del Matlab, se trazó una recta tangente al punto de inflexión de la curva, se utilizó la ecuación de la recta y la pendiente del punto de inflexión.

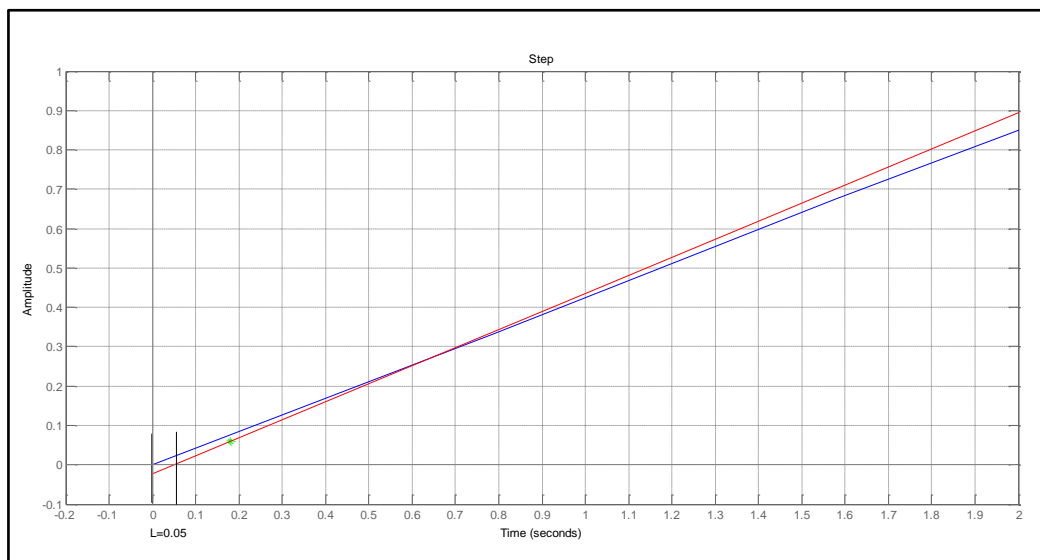
Realizando un zoom en la gráfica de la figura 42 y 43 se obtiene el valor del de tiempo de retardo  $L=0.05$  y  $T=2.56$ .

**Tabla 13**  
**Calculo de L y T**

<b>L=</b>	0.05
<b>T=</b>	2.56.



**Figura 42 Recta tangente al punto de inflexión en la curva de respuesta**



**Figura 43 Valor del tiempo muerto  $L=0.05$**

Se determinó los valores de  $K_p, T_i$ , empleando los datos de la tabla 14, descrita en la sección 2.5.5, referente al método 1 de Ziegler-Nichols

$$K_p = 0.9 \frac{T}{L} = 0.9 \left( \frac{2.56}{0.05} \right) = 46.08$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{0.05}{0.3} = 0.17$$

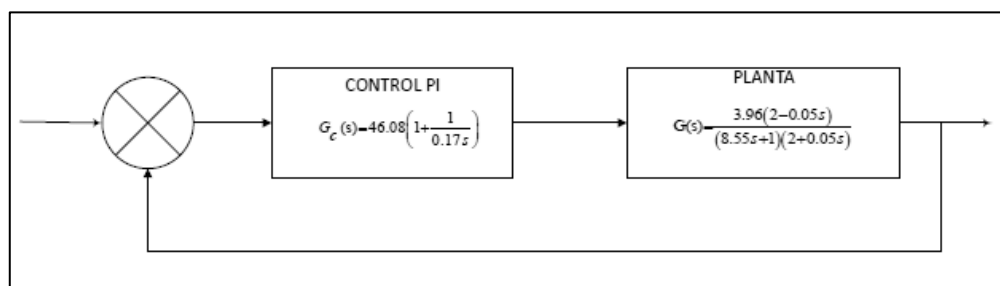
**Tabla 14**  
**Calculo de las constantes para diseño de controlador PI**

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PI calculado	46.08	0.17	0

Con los valores obtenidos, se reemplazó en la función de transferencia para un controlado PI así:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \rightarrow G_c(s) = 46.08 \left( 1 + \frac{1}{0.17s} \right)$$

Finalmente obtenemos la función de transferencia de lazo cerrado que involucra el control PI y la función  $G(s)$  de la planta con realimentación. Se muestra en la figura 44. el diagrama a bloques del sistema de una planta con un control PI implantado y realimentado



**Figura 44 Diagrama a bloques del sistema de una planta con un control PI**

*FT. planta*

$$G(s) = \frac{7.923 - 0.198s}{0.43s^2 + 17.15s + 1}$$

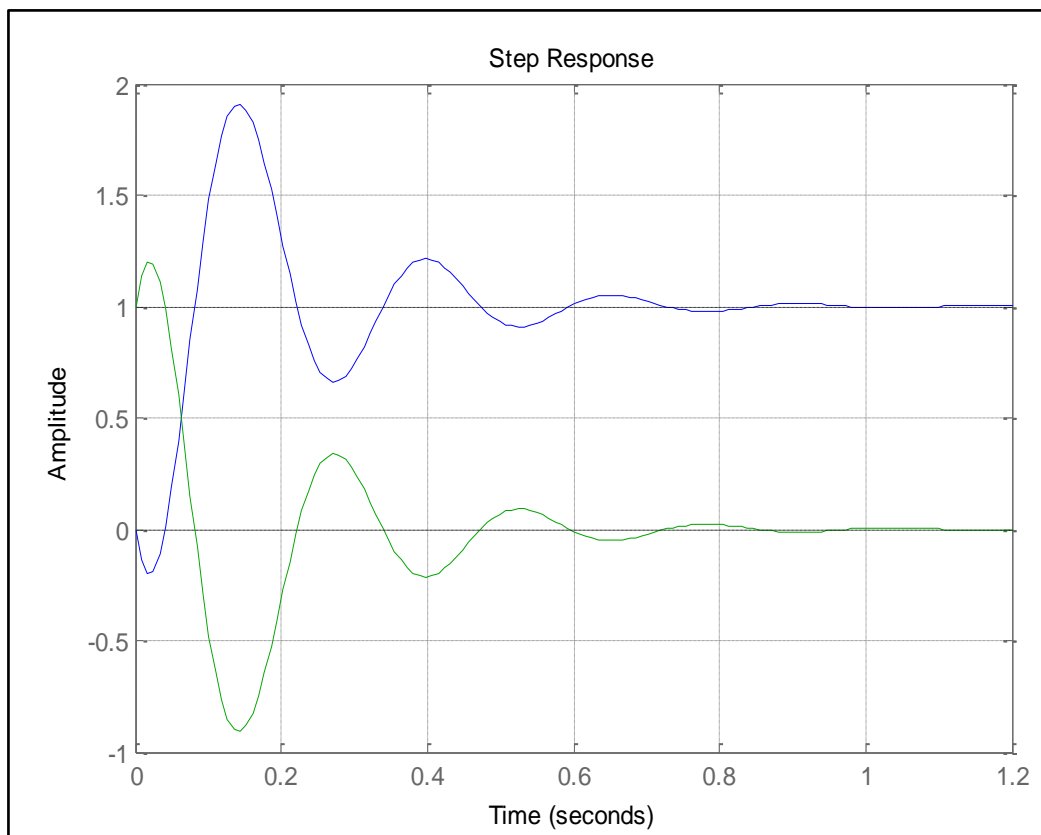
*FT. Controlador PI*

$$G_c(s) = 46.08 \left( 1 + \frac{1}{0.17s} \right)$$

*FT. de Lazo cerrado*

$$H_{LC} = \frac{-1.55 s^2 + 52.91 s + 365.1}{0.0731 s^3 + 1.365 s^2 + 53.08 s + 365.1}$$

Para observar la dinámica del controlador calculado aplicado a la planta se grafica en la figura 45, la respuesta ante un escalón.



**Figura 45** Respuesta de la planta ante una entrada escalón con PI teórico

A través de Matlab se obtuvo el controlador que muestro la sintonía adecuada con la planta y la respuesta ante una entrada escalón.

Controlador PI ajustado

$$G_c(s) = 2.2097 e^{-5} \left( \frac{s + 0.000666}{s} \right)$$

FT. controlador PI ajustado

$$G_c(s) = \frac{2.21e^{-5} s + 1.531e^{-8}}{s}$$

Reescribiendo la ecuación :

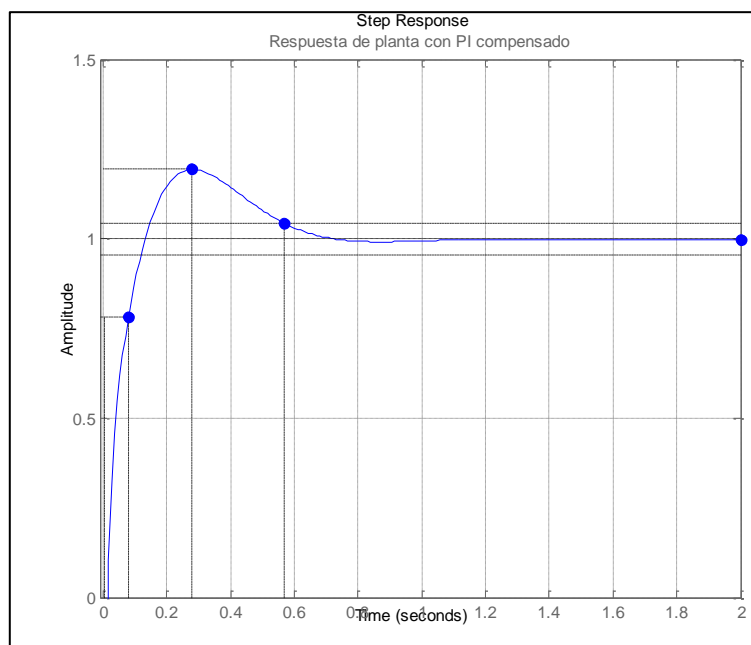
$$G_c(s) = 2.21e^{-5} \left( 1 + \frac{1}{1.5s} \right)$$

Donde :

$$K_p = 2.21e^{-5}$$

$$T_i = 1.5$$

Para observar la dinámica del controlador estimado en Matlab, aplicado a la planta se grafica en la figura 46, la respuesta ante un escalón.



**Figura 46** Respuesta de la planta ante una entrada escalón con PI ajustado



Se reemplazó los valores de  $K_P$  y  $T_i$  en las ecuaciones (2.25) y (2.26) dadas en la sección 2.5.8.

*Tiempo de muestreo :*

$$T = \frac{t_s}{25} \rightarrow T = \frac{118}{25} = 4,72$$

$$0 < T < 4,72$$

*Siendo : T = 4.52*

F.T. Controlador PID digital

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \left[ K_P + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1}) \right]$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \left[ a + \frac{b}{1-z^{-1}} + c(1-z^{-1}) \right]$$

Donde :

Ganancia proporcional

$$a = K_P$$

$$a = 2.21e^{-5} \approx 0.0031$$

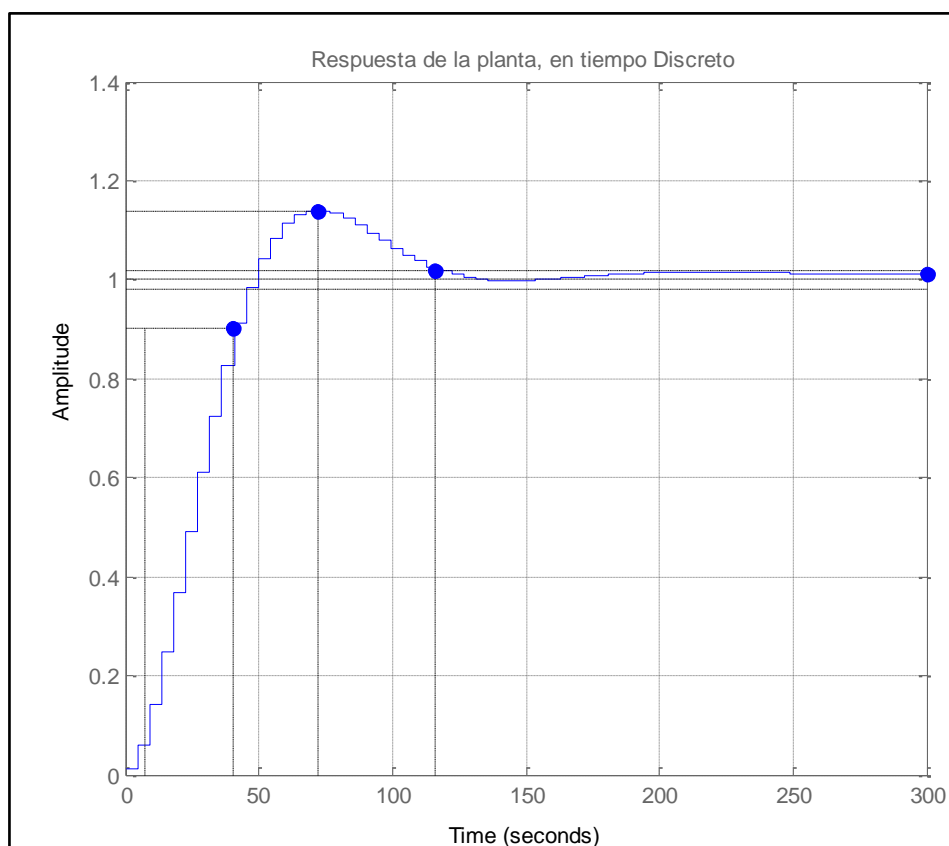
Ganancia integral

$$b = \frac{K_P T}{T_i}$$

$$b = \frac{2.21e^{-5} * 4.52}{1.5} \approx 0.00919$$

Estos valores de ganancia proporcional e integral se las utilizó en la implementación del controlador digital PI en el microcontrolador.

En la figura 47 se muestra la respuesta de la planta con el controlador en tiempo discreto.



**Figura 47** Respuesta de la planta, tiempo discreto  $t_s=4.52$

### 3.6. Diseño de Software

Antes de la implementación del algoritmo, se consideró las características del conversor análogo digital que posee el Arduino Uno este tiene una resolución de 10 bits, por lo que nos devolverá valores entre 0 y  $2^{10} = 1024$  para tensiones entre 0 y 5V, como al pin analógico A0 del arduino recibe el voltaje entregado por el circuito del sensor (termopar más acondicionador AD525) a una razón de cambio de  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ .

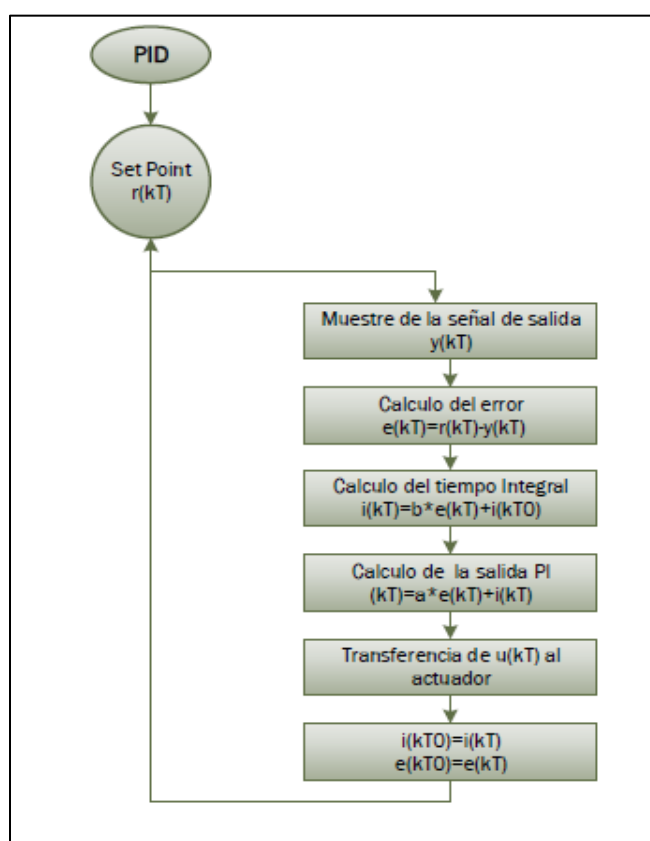
Para obtener la relación de salida se utiliza la función `map()` que incluye la librería de Arduino, que es sencilla y bastante útil, en esencia nos permite convertir un rango de variación en otro con toda sencillez. Con el algoritmo mostrado en la figura 48, se obtuvo el rango deseado:

```
Leer_temp = analogRead(Lectura_Temp);
valor_temp= map(Leer_temp,25,160,0,255);
```

**Figura 48 Estructura de la función map()**

Fuente: (García, 2016)

El algoritmo utilizado en el Arduino Uno, se muestra en el figura 49, se debe considerar que el tiempo de muestreo  $T$ , debe ser mayor que el tiempo de establecimiento del sistema en lazo abierto.



**Figura 49 Algoritmo de programación de PI digital en Arduino Uno**

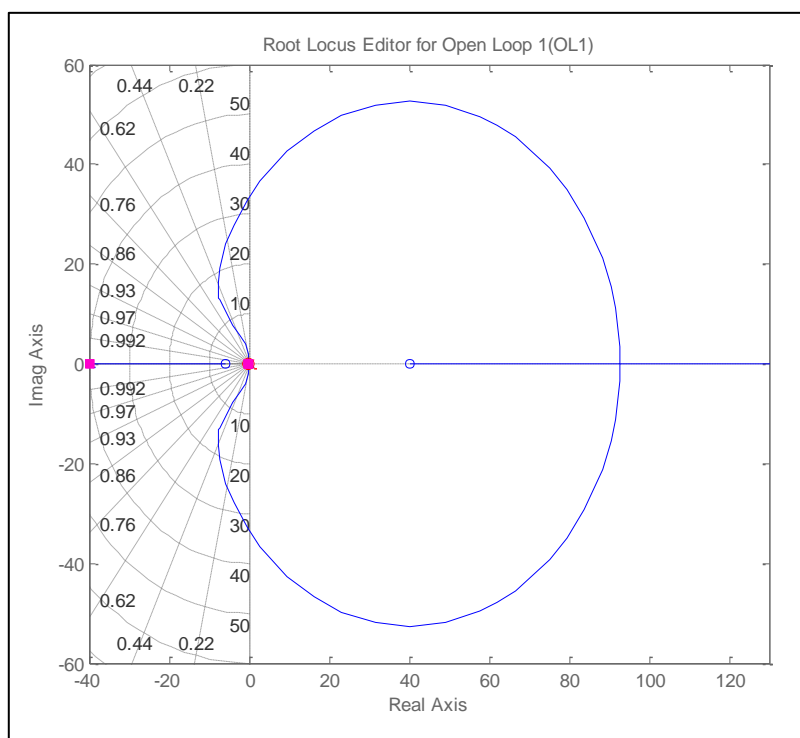
Para el control se lo realizó mediante una señal PWM proporcional a la señal generada por el controlador PI. El código fuente se utilizó el compilador de arduino versión 1.6.10 y de acuerdo al algoritmo planteado en la figura para la programación de PI en el microcontrolador, el código fuente se lo puede ver en el anexo I.

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 3.7. Análisis de la respuesta del sistema y ajustes finos

Ahora con el diseño del controlador, se realizó el análisis del comportamiento de la planta para lo cual se manejó de la toolbox de Matlab Sisotool, donde en primera instancia se graficó el diagrama de Root Locus para observar la estabilidad y ganancia de la planta, como se muestra en la figura 50.



**Figura 50 Diagrama de Root Locus de la planta con control PI**

El diagrama del lugar geométrico de las raíces, indica que la función de transferencia a lazo cerrado para nuestro sistema de control, tiene una fase mínima de

40°, esto es de interés debido a que los sistemas de control de procesos en la vida real, son de este tipo.

Esta gráfica nos proporciona la trayectoria que seguirán las raíces de la función de transferencia a lazo cerrado, a diferentes valores de las constantes de sintonía PI.

### 3.7.1. Estabilidad del sistema

La ganancia del sistema es de  $K < 100$ , en la tabla 15 observamos pruebas para diferentes valores de  $k$ , con sus respectivos polos en, con lo cual se comprueba que la planta se encuentra estable:

**Tabla 15**  
**Valores de K, Ganancia de la planta**

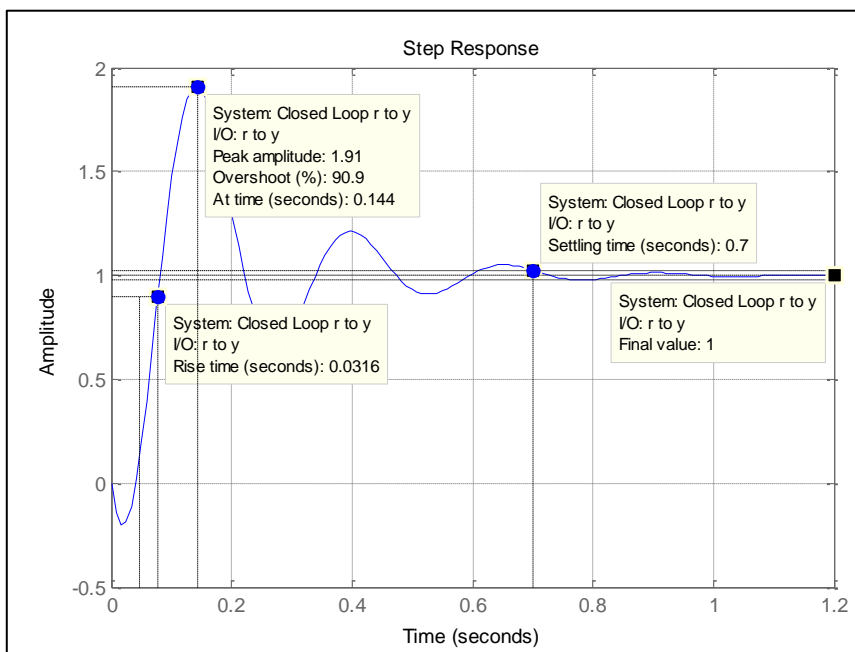
K=1	-39.8253, -0.0584, -0.0000
K=10	-39.8251, -0.0585, -0.0000
K=100	-39.8233, -0.0594, -0.0000

Seguidamente se observó el comportamiento del sistema ante una entrada escalón, Esta nos muestra la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado como se ve en la figura 51.

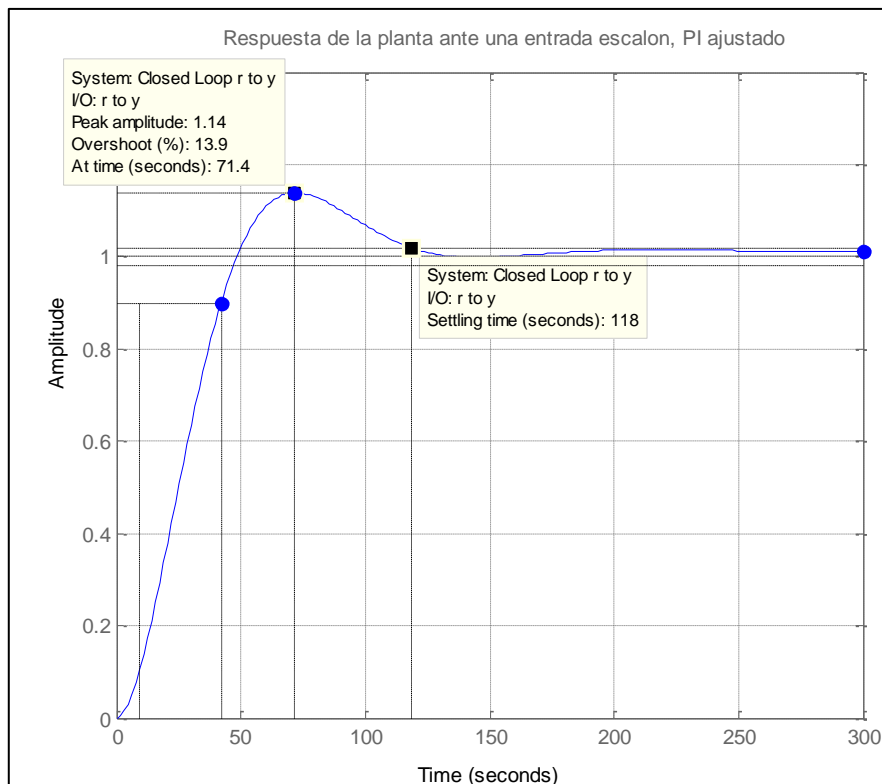
En base a esta grafica podemos observar que la respuesta al escalón del sistema de lazo cerrado con los parámetros del compensador calculado teóricamente, presentó sobrepaso de aproximadamente el 91% y tiempo de establecimiento  $t_s$  de 0.7 segundos.

Que para la planta se estima un sobrepaso del 20%, por lo que el controlador no cumplía con las condiciones de diseño.

Por lo tanto se realizó un refinamiento al sistema PI modificando  $K_p$ ,  $K_i$  aplicando la herramienta de Matlab, tras varias pruebas experimentales con distintos valores para  $K_i$ ,  $K_p$  y observar la respuesta del sistema con estos valores, hasta encontrar algunos que cumplan las condiciones deseadas o existan dentro del rango aceptado como se observa en la figura 52, se logró estabilizar la planta con un overshoot de 13,5% con un tiempo de establecimiento de 118 segundos.



**Figura 51** Respuesta de la planta ante una entrada escalón con PI teórico

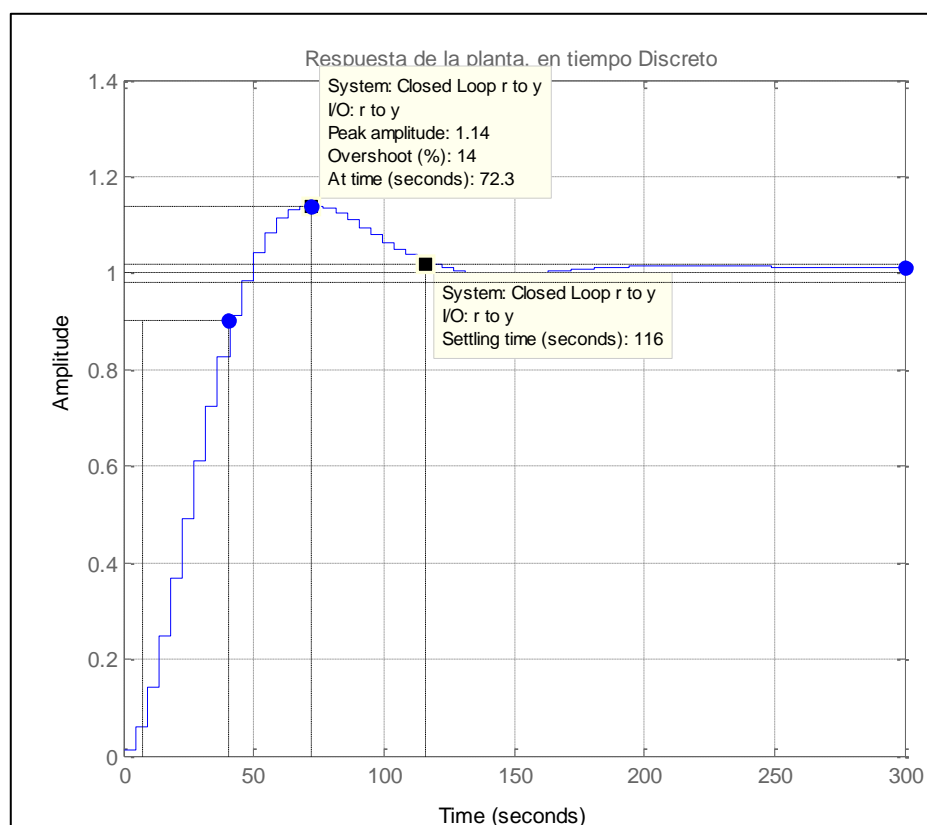


**Figura 52** Respuesta de la planta con controlador PI compensado

Sin embargo, partiendo de un análisis cualitativo, este comportamiento se encuentra dentro del conjunto de parámetros deseados, por lo que se concluye que el modelo es apto para la dinámica de la planta.

### 3.8. Controlador PI discreto

La respuesta en tiempo discreto se lo realizo con un tiempo de muestreo de 4.2, con lo que se obtuvo una respuesta favorable, puesto que se obtuvo un sobre paso de 14% con un tiempo de establecimiento de 72.3 segundo, como se muestra en la figura 53.



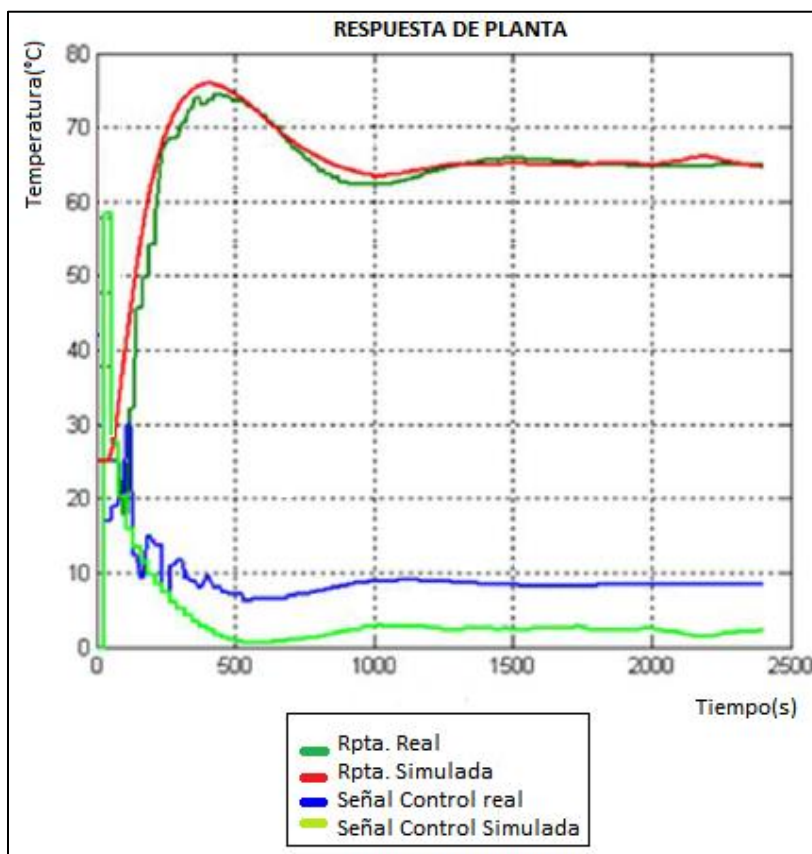
**Figura 53 Respuesta de la planta al control digital**

#### 3.8.1. Región de operación

Para la planta se utilizara un rango de temperatura de 60°C a 160°C, puesto que estos son los rangos de esterilización empleados para este tipo de equipo. Como se observa en la figura 54, se presentan cambios significativos de pendiente, en la respuesta

al escalón, por lo cual se requiere de regiones lineales, ya que estas se aproximan a comportamiento real de la planta.

A continuación a través de los módulos de simulación de la herramienta Sisotool, se muestra la temperatura medida por el termopar k, además de la señal de control aplicada, se observa en la figura 54.



**Figura 54 Respuesta de la planta a 60°C**

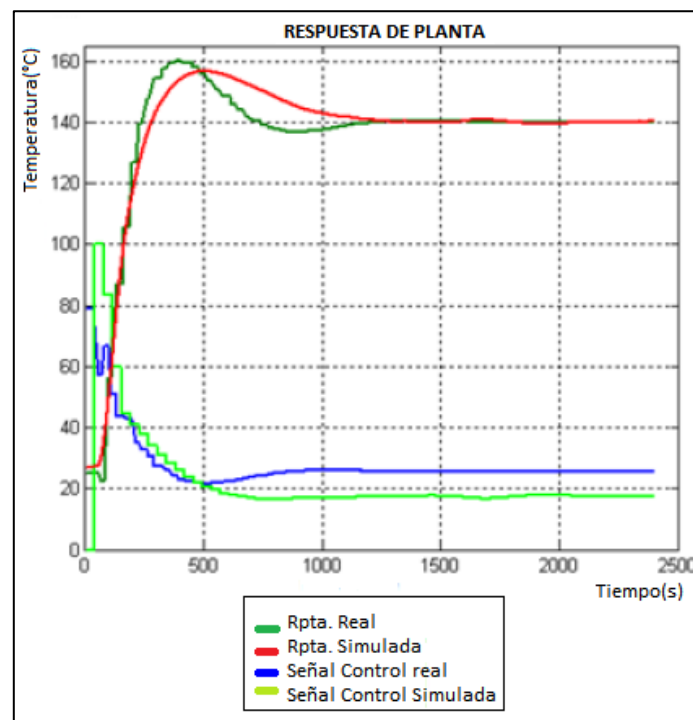
En la tabla 16, se muestra los datos proporcionados en la simulación fueron:

**Tabla 16**  
**Datos de la Simulación**

Valores	Valores obtenido planta
$M_p = 10\%$	$M_p = 17.6\%$
$t_s = 900s$	$t_s = 1200s$



A continuación se observa en la Figura 44 la respuesta de la planta para un setpoint de 140°C



**Figura 55 Respuesta de la planta a 140°C**

En la tabla 17, se muestra los datos proporcionados en la simulación fueron:

**Tabla 17**  
**Datos de la Simulación**

Valores	Valores obtenido planta
$M_p = 12.8\%$	$M_p = 14.5\%$
$t_s = 700s$	$t_s = 1340s$

$K_p$  da una salida del controlador que es proporcional al error. Este control presenta el problema que la temperatura jamás se estabiliza en el valor SP, lo que produce un error estacionario.  $K_i$  se dedica a mejorar el error estacionario, pero hace el sistema más lento.

Se observa que al exigir rapidez en el tiempo de establecimiento se incrementa la respuesta impulsiva lo que provoca un pico de saturación, que se presentó en los aproximadamente los 200 segundos en relación al estado estable.

## CONCLUSIONES

- Para el desarrollo de este proyecto se optó por construir un método de control clásico, como el PI, con el cual el error generado entre el set point y la variable de proceso pueda ser minimizado a través de la acción de control, si bien es cierto que en la actualidad existen un sinnúmero de métodos de control moderno, este se adaptó perfectamente a la estructura y características de desempeño deseadas para este equipo de área médica.
- La realimentación redujo los efectos de las perturbaciones en el comportamiento del sistema, permitiendo que la variable de proceso mantenga un perfil de desempeño de un 98% de eficacia, con lo que permite verificar que el diseño de control es adecuado.
- Tomando en cuenta los límites y rangos de operación del hardware implementado, el esfuerzo de control se encuentra acotado entre 40°C y 160°C, puesto que la saturación del actuador puede causar inestabilidad y una respuesta transitoria indeseable, sin embargo es necesario tener en cuenta en qué proporción puede saturarse el controlador sin afectar las especificaciones del diseño.
- En los resultados de las gráficas se observó que el controlador se satura, esto se debe a que la acción proporcional tiene un efecto inmediato sobre el error mientras que la integral no, generando una señal de control más rápida.
- El sistema alcanzó su tiempo de establecimiento ideal en aproximadamente 45 minutos, puesto que es un sistema térmico de respuesta lenta, ya que para intervalos menores, se encontraba presente oscilaciones e inestabilidad de la planta.
- Gracias a la corrección de fallas físicas del equipo, se obtuvo un buen selle térmico de la puerta con lo cual se eliminó la fuga de calor, con el nuevo panel de operación, se presentó un entorno amigable para el personal de enfermería que lo manipula.

## RECOMENDACIONES

- Para el área médica en el que se desarrolla este equipo, se observa conveniente la instalación de un segundo sensor de temperatura, para confirmar que la medición de temperatura corresponde realmente al flujo de aire que se circula dentro de la cavidad y no sea confundido con la temperatura de la carcasa interna del equipo.
- Para prolongar el tiempo de vida útil del equipo y puesto que se encuentra en un área cerrada, debido al trabajo que desempeña, es pertinente cambiar la estructura física del equipo, incorporando un ducto de ventilación para evitar futuros recalentamientos en el mismo.
- Para futuros trabajos en el equipo se puede considerar una modificación en el diseño del hardware, seleccionando el uso de un relé de estado sólido, ya que posee mayores prestaciones, para evitar los problemas de saturación, por limitaciones que presenta el actual actuador o bien se puede realizar un estudio sobre el efecto integrador wind-up y aplicar la respectiva modificación en el diseño del controlador PI.

## BIBLIOGRAFÍA

- Beauregard, B. (S.F.). Arduino Pid-Guia De Uso De La Libreria. Recuperado El 01 De 02 De 2016, De [Http://Brettbeauregard.Com/Blog/Wp-Content/Uploads/2012/07/Gu%C3%Ada-De-Uso-Pid-Para-Arduino.Pdf](http://Brettbeauregard.Com/Blog/Wp-Content/Uploads/2012/07/Gu%C3%Ada-De-Uso-Pid-Para-Arduino.Pdf)
- Aguado Behar, A., & Martínez Iranzo, M. (2003). Identificación Y Control Adaptativo. Prentice Hall.
- Alfonso Patiño, A. (2014). Diseño Y Elaboración De La Guía Para Sistemas Digitales Con Arduino Uno R3. Colombia.
- Analog Devices Inc. (1999). Monolithic Thermocouple Amplifiers With Cold Junction Compensation Ad595. Norwood, U.S.A. Recuperado El 15 De 01 De 2016, De [Www.Analog.Com](http://www.analog.com)
- Chapman, S. J. (2000). Máquinas Eléctricas.
- Coughlin, R., & Driscoll, F. (S.F.). Amplificadores Operacionales Y Circuitos Integrados Lineales. Mexico: Prentice Hall Hispanolamericana.
- Cuadros Acosta, I. (18 De 11 De 2015). Geek Electrónica. Recuperado El 22 De 08 De 2016, De [Https://Geekelectronica.Blogspot.Com/2015/11/Envio-De-Datos-Por-Puerto-Serial-Y.Html](https://geekelectronica.blogspot.com/2015/11/envio-de-datos-por-puerto-serial-y.html)
- Enriquez, G. (2000). El Abc De La Instrumentación En El Control De Procesos Industriales. Limusa.
- Flores T., A. (2006). Respuesta Dinámica De Sistemas Lineales De Primer Orden. Recuperado El 01 De 07 De 2016
- García, A. (2016). Tutorial Guía Para Arduino. Diymakers. Recuperado El 31 De 05 De 2016, De [Http://Diymakers.Es/Guia-Arduino/](http://diymakers.es/guia-arduino/)
- (S.F.). Guia Arduino. Recuperado El 31 De 05 De 2016, De [Http://Diymakers.Es/Guia-Arduino/](http://diymakers.es/guia-arduino/)

- Henry, P. (2014). Control Por Ángulo De Disparo. Juliaca-Perú.
- Jordán, M. (2015). Fundamentos De Control Realimentado. Recuperado El 18 De 05 De 2016
- Lilen, H. (1988). Tiristores Y Triacs: Principios Y Aplicaciones .
- Martínez, P., & Azuaga, M. (1997). Calibración De Termopares. Venezuela. Recuperado El 21 De 08 De 2016, De [Http://Www.Unet.Edu.Ve/~Nduran/Teoria\\_Instrucontrol/Termopares.Pdf](http://Www.Unet.Edu.Ve/~Nduran/Teoria_Instrucontrol/Termopares.Pdf)
- Nergiza. (27 De 06 De 2013). Recuperado El 28 De 01 De 2016, De [Http://Nergiza.Com/Radiacion-Conduccion-Y-Conveccion-Tres-Formas-De-Transferencia-De-Calor/](http://Nergiza.Com/Radiacion-Conduccion-Y-Conveccion-Tres-Formas-De-Transferencia-De-Calor/)
- Ogata, K. (1996). En Sistemas De Control En Tiempo Discreto (Segunda Edición Ed.). Mexico: Prentice Hall.
- Ogata, K. (2003). En Ingenieria De Control Moderna (4ª Edición Ed.). México: Prentice Hall.
- Patiño, A. (2014). Diseño Y Elaboración De La Guia Para Sistemas Digitales Con Arduino Uno R3. Trabajo De Grado , Universidad Tecnologica De Pereira, Pereira. Recuperado El 09 De 04 De 2016
- Reyes, J. S. (S.F.). Sistema De Control De Tempertura Con Labview Y Microcontrolador Atmel328p.
- Texas Instruments Incorporated. (1995). Moc3020 Thru Moc3023. Dallas, Texas.
- Thyristor Theory And Design Considerations Handbook. (S.F.). Recuperado El 31 De 05 De 2016, De [Http://Www.Onsemi.Com/Pub\\_Link/Collateral/Hbd855-D.Pdf](http://Www.Onsemi.Com/Pub_Link/Collateral/Hbd855-D.Pdf)
- Wika, I. (03 De 2014). Información Técnica Termopares. Recuperado El 30 De 03 De 2016, De [Http://De-De.Wika.De/Upload/Ds\\_In0023\\_Es\\_Es\\_62452.Pdf](http://De-De.Wika.De/Upload/Ds_In0023_Es_Es_62452.Pdf)