



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
CAMPUS SAN MARTÍN TEXMELUCAN
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID DE TEMPERATURA
PARA UN DESHIDRATADOR SOLAR EN EL ÁREA DE
INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PRESENTA:

**DANIELA JURADO LUENGAS
17100006**

ASESOR: M.I.A.P.I. ERIKSEN AQUINO DIAZ

SAN MARTIN TEXMELUCAN, PUE. ENERO, 2023

	Nombre del documento: Dictamen para Titulación Integral	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-04	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 1 Página 1 de 1	

San Martín Texmelucan, Pue., a 28 de marzo de 2022

ASUNTO: Dictamen para Titulación Integral

C. DANIELA JURADO LUENGAS
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de titulación integral con el proyecto **“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID DE TEMPERATURA PARA UN DESHIDRATADOR SOLAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN”**, me es grato informarle que fue **aceptada**, en modalidad **TESIS**, y se confirma como asesor a el **M.I.A.P.I. ERIKSEN AQUINO DÍAZ**.

Por lo que le solicito ponerse en contacto con su asesor, en caso de ser necesario.

Además, le informo que deberá pasar al Departamento de Servicios Escolares, a que le revisen su documentación.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica**
“Formación Tecnológica de Vanguardia para el Desarrollo Regional”



MTRO. ERIK FLORES OREA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

c.c.p. Subdirección de Estudios Profesionales. - PSC
 Departamento de Servicios Escolares. - PSC
 Expediente

	Nombre del documento: Liberación de Proyecto para la Titulación Integral	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-03	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 1	

San Martín Texmelucan, Pue., a 28 de marzo de 2022
 Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral.

ING. DAMIÁN HUERTA GARCÍA
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS PROFESIONALES DEL
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de la estudiante y/o egresada:	DANIELA JURADO LUENGAS
Carrera:	INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
No. de control:	17100006
Nombre del proyecto:	DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID DE TEMPERATURA PARA UN DESHIDRATADOR SOLAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN
Producto:	TESIS

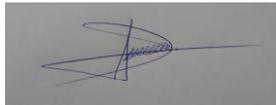
Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros/as egresados/as.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica**
"Formación Tecnológica de Vanguardia para el Desarrollo Regional"



MTRO. ERIK FLORES OREA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Nombre y firma del asesor	Nombre y firma del revisor*	Nombre y firma del revisor*
 M.I.A.P.I. ERIKSEN AQUINO DÍAZ	 MTRO. JOSÉ LUIS ESTRADA LIMÓN	 M.I.M. OSCAR ZARATE SAMPEDRO

* Solo aplica para el caso de tesis o tesina.

c.c.p.- Expediente

	Nombre del documento: Autorización de entrega de informe de Titulación.	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-08	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 1 Página 1 de 1	

San Martín Texmelucan, Puebla a 28 de marzo de 2022

**C. DANIELA JURADO LUENGAS
 PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
 P R E S E N T E**

De acuerdo a la normatividad vigente de nuestro instituto y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el comité revisor le hizo respecto a su informe de titulación integral titulado: **“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PID DE TEMPERATURA PARA UN DESHIDRATADOR SOLAR EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN”** comunico a Usted que:

HA SIDO LIBERADA Y SE LE AUTORIZA PARA QUE PROCEDA A LA FORMALIZACION DEL MISMO

Para lo cual deberá entregar su documento digital a la Subdirección de Estudios Profesionales, en un plazo de diez días hábiles contados a partir de la fecha del presente.

Es importante mencionar que usted deberá elegir la manera en que conservará su trabajo de titulación (libro, disco, etc.).

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
 “Formación Tecnológica de Vanguardia para el Desarrollo Regional”*



**MTRO. ERIK FLORES OREA
 JEFE DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

c.c.p. Expediente

Agradecimientos y dedicatorias

Agradezco a Dios, por estar a mi lado en cada paso que doy,

A mis padres, hermanos y amigos por todo el apoyo y fuerza que me brindaron para continuar con mis estudios y no darme por vencida,

A mi asesor, el maestro Erikssen Aquino Díaz, por ser mi guía constante en el desarrollo del presente proyecto y

A todo el cuerpo docente de la carrera de ingeniería electromecánica por su dedicación, paciencia y afecto al enseñar.

Índice general

Capítulo I Introducción.....	11
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Problema de Investigación.....	13
1.3. Justificación	13
1.4. Propósito del estudio	14
1.5. Objetivos del Estudio	14
1.5.1. Objetivo General.....	14
1.5.2. Objetivos específicos.....	15
1.6. Preguntas de Investigación.....	15
1.7. Planteamiento de Hipótesis	15
Capítulo II Revisión de la Literatura.....	16
2.1. Deshidratador solar	17
2.1.1. Definición.....	17
2.1.2. Funcionamiento	17
2.2. Teoría de modelamiento de un sistema.....	18
2.2.1. Modelado de sistemas térmicos	19
2.3. Transferencia de calor	20
2.3.1. Definición.....	20
2.3.2. Primera Ley de la Termodinámica.....	20
2.3.3. Mecanismos de transferencia de calor	21
2.4. Variables de proceso	23
2.4.1. Temperatura	23
2.4.2. Relación entre tiempo y temperatura.....	24
2.4.3. Producto	25

2.5.	Teoría de control.....	26
2.5.1.	Sistema de control.....	26
2.5.2.	Fundamentos teóricos de los sistemas de control.....	27
2.5.3.	Función de transferencia	27
2.5.4.	Diagrama de bloques	28
2.5.5.	Tipos de sistemas de control.....	29
2.5.6.	Identificación de procesos utilizando técnicas de lazo abierto	30
2.6.	Diseño de sistemas de control.....	34
2.6.1.	Configuraciones del controlador	34
2.6.2.	Tipos de controladores	36
2.6.3.	Principios fundamentales de diseño	36
2.7.	Controlador PID.....	37
2.7.1.	Introducción al control PID	37
2.7.2.	Teoría de Control PID.....	37
2.7.3.	Funcionamiento	39
2.7.4.	Ajuste de parámetros del PID.....	43
	Capítulo III Metodología	47
3.1.	Representación estadística	48
3.2.	Fuentes de Información	48
3.3.	Técnicas e instrumentos	48
3.4.	Procedimientos	49
	Capítulo IV Resultados.....	51
4.1.	Presentación de resultados	52
4.2.	Aplicación de herramientas, métodos aplicados y/o estudios realizados	67
	Capítulo V Discusión	76

5.1. Resultados obtenidos & esperados	77
5.2. Conclusiones	77
5.3. Recomendaciones y aportación.....	78
Referencias bibliográficas.....	79
Anexos Glosario Registro de Proyecto (patentes, derecho de autor, compra venta del proyecto, etc.).....	83

Índice de tablas

Tabla 1. Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.	34
Tabla 2. Reglas de sintonización Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.....	46

Índice de figuras

Figura 2.1 Funcionamiento de un deshidratador solar	18
Figura 2.2 Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección	22
Figura 2.3 Relación de variables manipuladas de forma incorrecta	24
Figura 2.4 Principales estados de México productores de pera en 2020	25
Figura 2.5 Componentes básicos de un sistema de control	26
Figura 2.6 Diagrama de bloques con función escalón de entrada aplicada a una planta	28
Figura 2.7 Sistema de control en lazo abierto	29
Figura 2.8 Sistema de control en lazo cerrado	30
Figura 2.9 Sistema de control realimentado	31
Figura 2.10 Método de dos puntos. Curva de reacción	33
Figura 2.11 Proceso controlado.....	34
Figura 2.12 Configuraciones de varios controladores en la compensación de sistemas de control. (a) Compensación en serie o cascada. (b) Compensación mediante realimentación.	35
Figura 2.13 Controlador PID.....	38
Figura 2.14 Controlador PID electrónico	39
Figura 2.15 Configuración inversora.....	41
Figura 2.16 Determinación de parámetros para el diseño del controlador.	45
Figura 4.1 Modelo del deshidratador solar	53
Figura 4.2 Diagrama de bloques del sistema de control.....	53
Figura 4.3 Sistema térmico.....	54
Figura 4.4 Entrada escalón en bucle abierto	57

Figura 4.5 Polo de la función de transferencia en el plano complejo (Método de Smith).	58
Figura 4.6 Código en Matlab para la identificación de la planta.	58
Figura 4.7 Identificación de la función de transferencia de la planta por medio de Plant Identification	59
Figura 4.8 Polo de la función de transferencia en el plano complejo (por medio de Plant Identification).	60
Figura 4.9 Sistema de control en Xcos Scilab.	61
Figura 4.10 Sistema de control analógico en Multisim.	61
Figura 4.11 Determinación de los componentes del sistema de control analógico.	62
Figura 4.12 Diagrama de bloques del sistema de control.....	67
Figura 4.13 Sistema de control en Proteus.....	67
Figura 4.14 Respuesta del sistema de control en Proteus para un Set Point de 65°C.	68
Figura 4.15 Circuito restador.	68
Figura 4.16 Divisor de voltaje.	69
Figura 4.17 Sensor de temperatura LM35.....	70
Figura 4.18 Sensor de temperatura con amplificador no inversor.	70
Figura 4.19 Circuito de control.....	71
Figura 4.20 Respuesta del sistema de control con 0.1V / °C.....	71
Figura 4.21 Respuesta del sistema de control con el Método Smith.	72
Figura 4.22 Respuesta del sistema de control con los parámetros obtenidos por medio de Matlab.....	73
Figura 4.23 Respuesta del sistema de control con una perturbación de 5°C.....	73
Figura 4.24 Respuesta del sistema de control con una perturbación de 17°C.....	74
Figura 4.25 Respuesta del sistema de control con una perturbación de 17°C.....	74

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las tecnologías de deshidratado solar que se han desarrollado a lo largo de los años están orientadas a soluciones económicas, como apoyo a pequeños y medianos productores, compatibles con el medio ambiente, buscando la eficiencia energética y utilizando materiales de fácil acceso.

En los estudios más recientes lo que se busca es poder controlar las variables que afectan directamente las características de los frutos que se desean deshidratar, en la mayoría de los casos se trata de la temperatura ya que esta puede perjudicar de manera negativa a los productos si no se mantiene en un rango adecuado.

Existen varios artículos, estudios y tesis sobre el diseño de controladores de temperatura, algunos haciendo uso del control ON-OFF como el realizado por Giraldo Sepúlveda, E.J. (2014) quien presentó el diseño de un controlador de temperatura y humedad relativa para un deshidratador solar de frutas.

La mayoría de los trabajos realizados no se han centrado en el diseño de controladores PID para deshidratadores solares, pero sí existen algunos, como el realizado por Rodríguez B., Villanueva E. & Partida A. (2017) quienes realizaron el diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar de jitomates.

La diferencia entre este trabajo y los que se han realizado anteriormente radica en la consecución de objetivos diferentes, que en este caso es reflejar en la práctica la teoría de control clásica aplicada al diseño de un controlador PID de temperatura para un deshidratador solar, realizando desde la identificación de la planta hasta la posterior aplicación de las técnicas de control existentes.

1.2. Problema de Investigación

En México, la energía solar es ampliamente utilizada en la generación de electricidad (Rodríguez Suárez, 2017). Sin embargo, esta energía prácticamente no es aprovechada en procesos de conservación de alimentos. La razón de que se usen mayormente otras técnicas de deshidratación en lugar de aprovechar los deshidratadores solares, es que no suele haber control de la temperatura, lo cual puede ser perjudicial para los alimentos, ya que pueden sufrir las siguientes alteraciones: desarrollo de hongos y levaduras, degradación del color, pérdida de nutrientes, sabor, aroma, textura, contracción o colapso, formación de corteza, etc. (Chacón, 2018).

Al respecto, es necesario el diseño de un controlador de temperatura, que permita controlar esta variable en el proceso de deshidratado de alimentos de manera económica, resolviendo la mayoría de los problemas mencionados anteriormente.

Tengo que agregar lo educativo

Así, con la realización de este proyecto lo que se busca es diseñar un controlador de temperatura para automatizar un deshidratador solar; haciendo uso del método de Ziegler-Nichols con el fin de controlar la temperatura y validar su funcionamiento en los programas de simulación Scilab, Matlab y Proteus.

De esta manera, ante lo anteriormente expuesto, la pregunta principal que guía la realización de este proyecto es: ¿Es posible el diseño de un controlador *PID* que permita controlar la temperatura en un deshidratador solar de frutos?

1.3. Justificación

El desarrollo tecnológico ha permitido el aprovechamiento de la energía solar como una alternativa a las fuentes de energía tradicional. Sin embargo, en México aún existen barreras para el aprovechamiento integral de este enorme recurso energético. Entre los principales obstáculos para lograr este aprovechamiento se encuentran; el desconocimiento y falta de habilidades de corte técnico para la adaptación y transferencia de estas tecnologías a las necesidades cotidianas (Rodríguez Suárez, 2017).

Con la realización de este proyecto se generará experiencia técnica en la adaptación de tecnologías para el diseño de controladores PID, esto mediante el uso del método de Ziegler-Nichols.

El no contar con un controlador de temperatura en los deshidratadores solares es la razón principal de que se usen mayormente otras técnicas de deshidratación, ya que el poco o nulo control de esta variable es perjudicial para los alimentos, ocasionando la pérdida de nutrientes, el desarrollo de hongos, la formación de corteza, e incluso algunos alimentos terminan pudriéndose, en especial las hortalizas que no contienen azúcar que actúe de conservante (Chacón, 2018).

En respuesta a esta realidad, este proyecto ofrece la oportunidad de resolver algunos de los problemas mencionados anteriormente, aunque esto se limite únicamente a una validación mediante simulación.

1.4. Propósito del estudio

El propósito de la realización de este proyecto es reflejar en la práctica la teoría de control clásico aplicada al diseño de un controlador PID de temperatura para un deshidratador solar, realizando y explicando detalladamente todas las etapas del diseño y simulando su funcionamiento.

1.5. Objetivos del Estudio

1.5.1. Objetivo General

Diseñar un controlador PID con el fin de regular la temperatura dentro de un deshidratador solar de frutos; haciendo uso del método de Ziegler-Nichols.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recolectar los datos necesarios mediante un análisis para modelar matemáticamente el comportamiento de la planta.
- Diseñar el controlador haciendo uso del método de Ziegler-Nichols para controlar la temperatura del deshidratador solar.
- Simular sistema el control de temperatura mediante el uso del software Matlab, Scilab y Proteus para comprobar los resultados obtenidos de manera teórica.

1.6. Preguntas de Investigación

La pregunta principal que guía la realización de este proyecto es: ¿Es posible el diseño de un controlador *PID* analógico que permita controlar la temperatura en un deshidratador solar de frutos?

1.7. Planteamiento de Hipótesis

- El controlador PID permitirá un mejor control del tiempo de respuesta y aumentará la precisión de la misma.
- El diseño del controlador PID de permitirá regular la temperatura dentro del deshidratador solar, permitiendo aprovechar la energía solar al máximo.
- El sistema de control será estable y capaz de responder adecuadamente a las perturbaciones externas del sistema.

CAPÍTULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA

Es importante contar con un fundamento teórico y hacer una revisión de la bibliografía que esté directamente relacionada con las áreas del deshidratado de alimentos, modelado de sistemas térmicos y del control automático, mismas que proporcionarán las bases suficientes para la solución de la problemática de la presente investigación.

2.1. Deshidratador solar

2.1.1. Definición

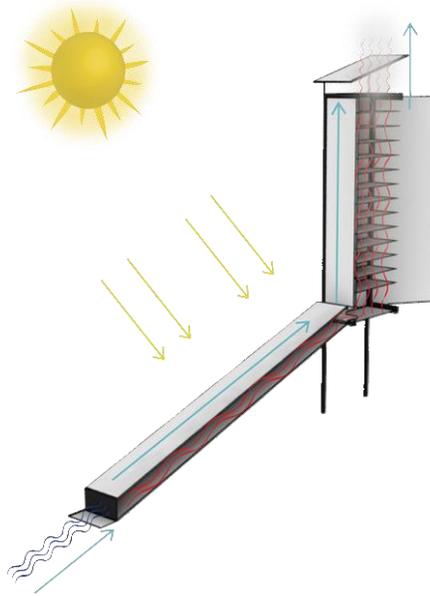
Los deshidratadores solares son dispositivos que utilizan la radiación solar para calentar aire y así retirar el agua de los tejidos de productos como frutas, verduras, semillas, carne, hierbas o madera. Ya que han sido deshidratados, los alimentos pueden conservarse secos hasta por un año sin perder sus propiedades nutritivas, bromatológicas y organolépticas. La deshidratación solar es una alternativa renovable para la microindustria y un mecanismo de desarrollo económico para pequeños productores hortofrutícolas (UNAM, 2021).

2.1.2. Funcionamiento

La energía llega del sol como radiación, las paredes del colector se calientan por conducción. El aire fresco que entra se calienta, y circula hacia el área de secado por un proceso de convección. El agua contenida en los productos se evapora y sale por la parte superior del área de secado. Finalmente, el aire cargado de humedad sale por el área de evacuación y se disipa en el ambiente (Véase figura 2.1). El proceso constante de convección conlleva al secado de los frutos en lapsos de tiempo que dependen de las condiciones climáticas y microclimáticas del día y el sitio donde se encuentre funcionando el deshidratador (UNAM, 2021).

Figura 2.1

Funcionamiento de un deshidratador solar



Nota. Adaptado de *Funcionamiento de un deshidratador solar*, por UNAM, 2021
(<https://ecotec.unam.mx/ecoteca/deshidratadores-solares-2>) . CC BY 4.0

2.2. Teoría de modelamiento de un sistema

Para Reyes Sierra (2010) el objetivo de modelar un sistema, consiste en llegar a describirlo en la forma más completa, exacta y sencilla posible, para posteriormente analizarlo y poder realizar diseños de controladores de tal manera que su funcionamiento se adecue a los requerimientos de diseño. El modelo matemático se basa en una o varias ecuaciones que representan el comportamiento del sistema, pero no representan un único modelo, pues se pueden lograr representaciones diferentes del mismo sistema que no contradicen una a la otra (p. 9).

Realizar un modelo físico comprende dos aspectos importantes: hallar las características dinámicas del sistema con base en la teoría matemática, desarrollos experimentales y la información que se tenga de la planta; para posteriormente realizar aproximaciones bajo criterios válidos que simplifiquen el resultado obtenido (Reyes Sierra, 2010, p.9).

Se puede decir que para el modelado de un sistema térmico, que es el problema a tratar en esta investigación, deben tenerse en cuenta diferentes parámetros del sistema que

permitan obtener una representación aproximada de la planta a partir de la relación entre entrada y salida.

2.2.1. Modelado de sistemas térmicos

Para Ogata (2008) los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Generalmente, estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia, aunque la capacitancia térmica y la resistencia térmica tal vez no representen la mayor precisión, se utilizan para simplificar el análisis (p. 96).

Reyes Sierra (2010) escribe que como un método adicional al análisis de sistemas a partir de las entradas y salidas del mismo es posible establecer un modelo que tenga en cuenta las características físicas y en específico térmicas, propias de la planta. Sin embargo estos métodos no son estrictamente independientes y es útil hacer un acercamiento entre estos para obtener una aproximación más acertada del comportamiento real del sistema. Para lograr esto se necesitan tener en cuenta tres aspectos:

A partir de las variables a controlar, se debe tener en cuenta cuales son las entradas, salidas y variables internas del proceso. De la misma forma se deben tener en cuenta cuales son las constantes y parámetros que intervienen (p. 9).

En segunda estancia se describen las relaciones matemáticas que involucran todos los parámetros físicos involucrados, para que finalmente se determinen ecuaciones que enlacen estas relaciones, formando así un modelo que puede ser comparado y ajustado con respecto a otros métodos de modelado, como el de relación entradas, salidas del sistema (Reyes Sierra, 2010, p. 10).

Reyes Sierra (2010) escribe que normalmente la temperatura no es homogénea en un cuerpo y por lo contrario presenta gradientes de temperatura que dan lugar a ecuaciones diferenciales con derivadas parciales y parámetros distribuidos. Por este motivo se hacen simplificaciones a modelos donde el cuerpo se divide en pequeñas regiones que se

consideran como homogéneas, e isotérmicas simplemente suponiendo homogeneidad en todo el sistema debido a condiciones particulares (p. 10).

En termodinámica se definen algunas propiedades físicas que relacionan la temperatura y el flujo de calor, una de estas es la transferencia de calor que se puede dar por conducción, convección y radiación, aunque la mayor parte de los procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor por radiación. (Reyes Sierra, 2010, p. 10).

2.3. Transferencia de calor

2.3.1. Definición

De acuerdo con Cengel (2007), un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura (p. 17).

2.3.2. Primera Ley de la Termodinámica

Cengel (2007) escribe que la primera ley de la termodinámica, que también es conocida como principio de conservación de la energía, expresa que en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue:

El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso. Es decir (p.11),

$$\begin{aligned} & (\text{Energía total que entra en el sistema}) - (\text{Energía total que sale del sistema}) = \\ & \quad (\text{Cambio en la energía total del sistema}) \end{aligned}$$

Dado que la energía se puede transferir hacia un sistema, o hacia afuera de éste, por medio de calor, trabajo y flujo de masa, y que la energía total de un sistema simple compresible consta de las energías interna, cinética y potencial, el balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como (Cengel, 2007, p.11)

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sistema} \quad (2.1)$$



Transferencia neta
de energía por
calor, trabajo y
masa



Cambio en las
energías interna,
cinética, potencial,

2.3.3. Mecanismos de transferencia de calor

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja (Cengel, 2007, p. 17).

Convección

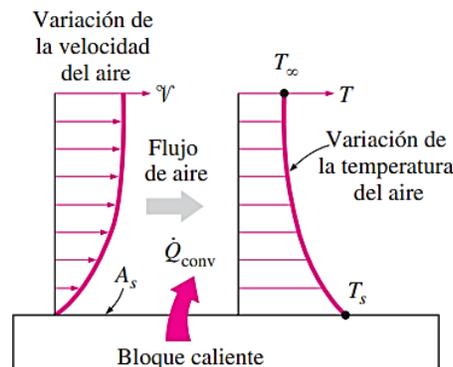
Cengel (2007) escribe que la convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es

el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia (p. 25) (Véase Figura 2.2).

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido (Cengel, 2007, p. 26).

Figura 2.2

Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección



Nota. Adaptado de *Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección* (p.26), por Y. A. Cengel, 2007, McGraw-Hill Education.

La transferencia de calor entre el bloque y el aire circundante será por conducción si la diferencia de temperatura entre el aire y el bloque no es suficientemente grande como para vencer la resistencia de ese aire al movimiento y, por consiguiente, para iniciar corrientes naturales de convección (Cengel, 2007, p. 26).

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido

durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación (Cengel, 2007, p. 26).

Ley de enfriamiento de Newton

Cengel (2007) escribe que pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2.2)$$

en donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ o $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. Note que en la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido (p. 26).

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo (Cengel, 2007, p. 26).

2.4. Variables de proceso

2.4.1. Temperatura

Para efectos del deshidratador se debe tener en cuenta que mientras mayor sea el diferencial de temperatura entre el medio calórico y el producto, mayor será la transferencia del calor al producto, permitiendo mayor extracción de humedad desde el interior. Cuando el medio calórico es el aire, la temperatura juega un rol importante (Giraldo Sepúlveda, 2014, p. 13).

El agua se extrae de la fruta como vapor y este debe de ser transportado fuera del deshidratador, de lo contrario, la humedad relativa aumentará retardando la extracción del agua del producto. Mientras más caliente sea el aire, mayor será la humedad que podrá contener antes de saturarse, de esta forma el aire caliente puede extraer una mayor cantidad de humedad del producto que el aire frío. (Valdés, 2008).

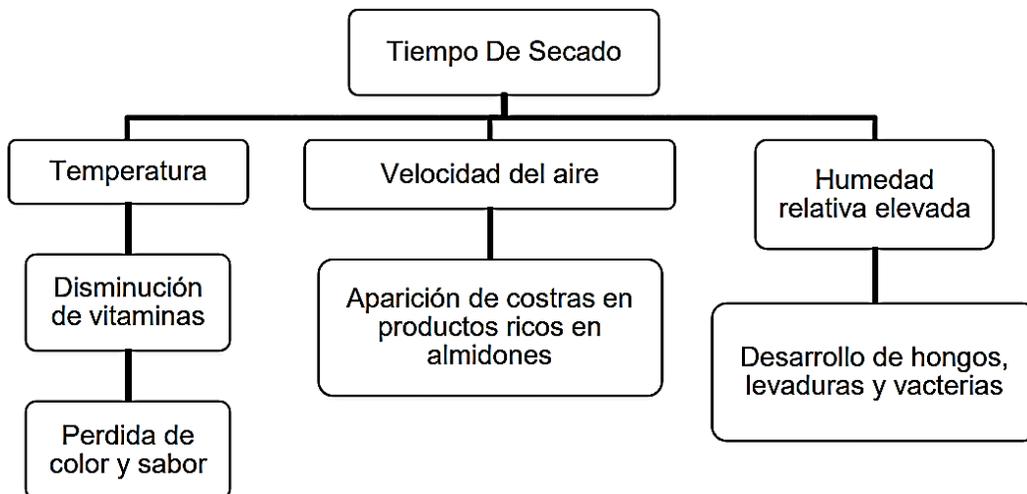
2.4.2. Relación entre tiempo y temperatura

Puesto que todos los métodos más importantes para deshidratar alimento se basan en el calor y que los constituyentes del alimento son sensibles al calor, se debe llegar a un compromiso entre la intensidad máxima de deshidratación y el mantenimiento de la calidad del alimento (ver Figura 2.3).

El proceso de deshidratación puede emplear relativamente altas temperaturas por poco tiempo para que el daño al alimento sea menor que menores temperaturas por tiempos más prolongados (Giraldo Sepúlveda, 2014, p. 15).

Figura 2.3

Relación de variables manipuladas de forma incorrecta



Nota. Adaptado de *Relación de variables manipuladas de forma incorrecta*, por E. J. Giraldo Sepúlveda, 2014 (<http://hdl.handle.net/11059/5129>). Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

2.4.3. Producto

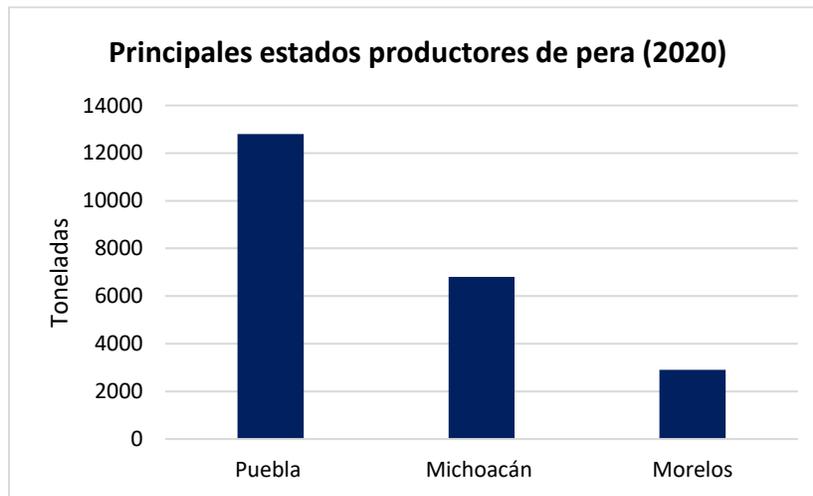
Para Valdés (2008) las características del producto, su naturaleza y el tamaño de las partículas también influyen en la intensidad del deshidratado. Muchos alimentos tienen una capa exterior de protección que impide que su interior se seque por completo.

El nivel de secado de algunos productos puede facilitarse si el alimento se pela y/o se corta. Luego que la humedad de la superficie de un alimento se ha retirado por evaporación, la intensidad de secado depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige hacia su superficie, la que varía de un producto a otro. (Giraldo Sepúlveda, 2014, p. 16).

Como se ha mencionado anteriormente, la temperatura adecuada de deshidratado varía dependiendo de cada alimento, así para fines de esta investigación se seleccionó la pera, ya que Puebla ocupa el primer lugar en producción de este fruto a nivel nacional (Véase Figura 2.4) y San Martín Texmelucan se encuentra entre los principales municipios productores de este fruto (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; Delegación SADER Puebla, 2018).

Figura 2.4

Principales estados de México productores de pera en 2020



Nota. Adaptado de *Principales estados de México productores de pera en 2020*, por

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020

(<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-pera-que-te-espera?idiom=es>).

Attribution NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

Gascón et al (2006), deshidrataron pera de la variedad Williams empleando un horno para tal fin. Encontraron que la temperatura juega un gran papel para la coloración de la pulpa en el deshidratado, y la máxima permisible es de 75 °C, el tiempo de deshidratado es de 8 h.

De Michelis & Ohaco (2017), deshidrataron pera de la variedad Bartlett y sugirieron que la temperatura de operación debe oscilar entre 50 °C a 70°C, ya que a una temperatura mayor de 70°C se modifican las características tisulares.

2.5. Teoría de control

2.5.1. Sistema de control

Carrillo (2011) define un sistema de control como el conjunto de elementos que funcionan de manera concatenada para proporcionar una salida o respuesta deseada.

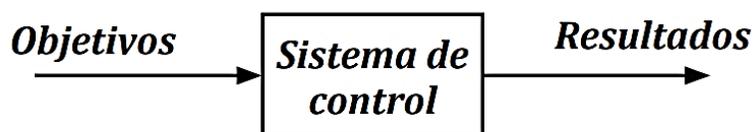
Los componentes básicos de un sistema de control pueden ser descritos por:

- a) Objetivos de control
- b) Componentes del sistema de control
- c) Resultados o salida

La relación básica entre estos tres componentes se muestra en la Figura 2.5 los objetivos de control pueden ser identificados como entradas o señales entrantes, los resultados son considerados las salidas o las variables controladas; en general, el objetivo del sistema de control es controlar la salida de manera ordenada actuando los elementos de control sobre la señal de entrada (p. 20).

Figura 2.5

Componentes básicos de un sistema de control



Nota. Adaptado de *Componentes básicos de un sistema de control* (p.20), por A. J. Carrillo, 2011, UNERMB.

2.5.2. Fundamentos teóricos de los sistemas de control

Carrillo (2011) escribe que para entender el funcionamiento de los sistemas de control es necesario conocer algunos conceptos básicos, los cuales se definen a continuación:

- **Variable controlada:** es la cantidad o condición que se mide y controla (salida del sistema).
- **Planta:** se designa como planta a cualquier objeto físico que ha de ser controlado.
- **Proceso:** operación progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados (acción que se va a controlar).
- **Sistema:** Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.
- **Perturbación:** señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. (p. 23)

2.5.3. Función de transferencia

Ogata (1998) define la función de transferencia de un sistema, como el modelo matemático que describe el funcionamiento de un sistema dinámico, mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo, constituida por el cociente de la transformada de Laplace de la función de respuesta (salida del sistema), entre la transformada de Laplace de la función de referencia (entrada del sistema), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero (p. 60). Lo anterior se representa mediante la siguiente expresión matemática:

$$G(s) = \frac{O(s)}{I(s)} \quad (2.3)$$

La función de transferencia $G(s)$ determina el funcionamiento del sistema, al relacionar la función de entrada $I(s)$ con respecto a la función de salida $O(s)$, independientemente de sus magnitudes, la utilidad de $G(s)$ es facilitar el análisis del funcionamiento del sistema

que describe, si $G(s)$ es desconocida, se puede obtener experimentalmente introduciendo entradas conocidas (entre las más comunes, funciones rampa, escalón e impulso unitario) y estudiando la salida del sistema (Ogata, 1998, p. 61).

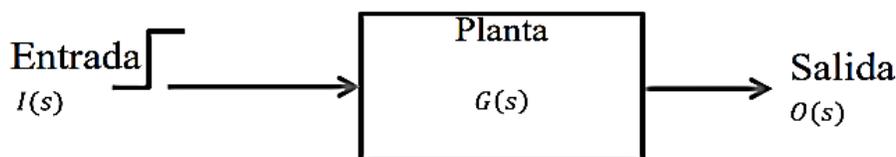
La función de transferencia es una propiedad de un sistema, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación (Ogata, 1998, p. 61).

2.5.4. Diagrama de bloques

Ogata (1998) escribe que un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Tal diagrama muestra las relaciones existentes entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar en forma más realista el flujo de las señales del sistema real (p. 63). En un diagrama de bloques se enlazan una con otra todas las variables del sistema, mediante bloques funcionales. El bloque funcional o simplemente bloque es un símbolo para representar la operación matemática que sobre la señal de entrada hace el bloque para producir la salida (Ogata, 1998, p. 63).

Figura 2.6

Diagrama de bloques con función escalón de entrada aplicada a una planta



Nota. Adaptado de *Diagrama de bloques con función escalón de entrada aplicada a una planta* por J.C. Ambriz Polo, 2015 (<http://hdl.handle.net/20.500.11799/58930>) . Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

La figura 2.6 muestra un elemento del diagrama de bloques. La punta de flecha que señala el bloque indica la entrada, y la punta de flecha que se aleja del bloque representa la salida. Tales flechas se conocen como señales (Ogata, 1998, p. 64).

2.5.5. Tipos de sistemas de control

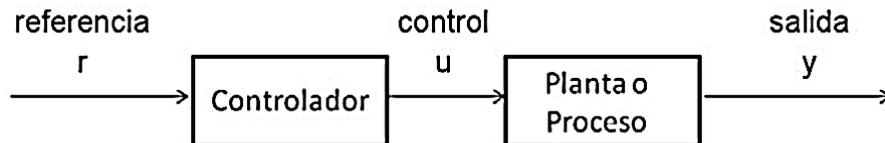
Sistemas de control en lazo abierto

Para Ambriz Polo (2015) los sistemas en lazo abierto son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir; en un sistema de control en lazo abierto cualquiera, no se compara la salida con la entrada de referencia; por lo tanto, para cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija (una calibración realizada previamente); como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración (Véase la Figura 2.7) (p. 31).

En presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no cumple su función asignada. En la práctica, solo se puede usar el control en lazo abierto si la relación entre la entrada y la salida es conocida y si no hay perturbaciones internas ni externas (Ogata, 1998).

Figura 2.7

Sistema de control en lazo abierto



Nota. Adaptado de *Sistema de control en lazo abierto* por J. Sánchez, 2009

(http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/8/TDE-2012-09-11T22:57:57Z-1592/Publico/sanchezjesdely_parte1.pdf). Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

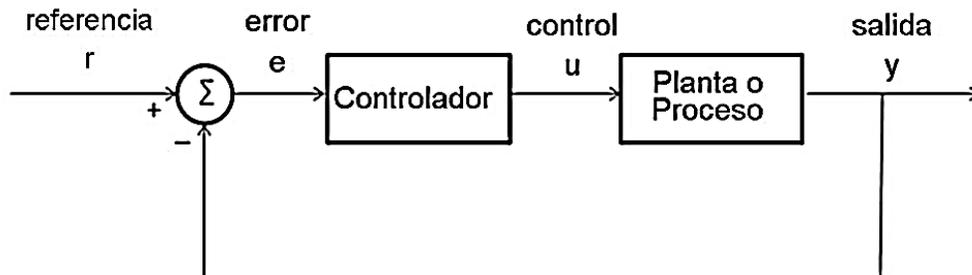
Sistemas de control en lazo cerrado

Carrillo (2011) explica que en el sistema de control a lazo cerrado, el controlador se alimenta de la señal de error de desempeño, la cual representa la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del

sistema a un valor deseado (Véase Figura 2.8). El término lazo cerrado siempre indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema (p.24).

Figura 2.8

Sistema de control en lazo cerrado



Nota. Adaptado de *Sistema de control en lazo cerrado* por J. Sánchez, 2009

(http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/8/TDE-2012-09-11T22:57:57Z-1592/Publico/sanchezjesdely_parte1.pdf). Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Ogata (1998) escribe que en un sistema de control de temperatura, la señal de salida es la temperatura controlada. La señal de salida, que tiene la dimensión de la temperatura, debe convertirse a un voltaje antes de que pueda compararse con la señal de entrada. Esta conversión se consigue mediante el elemento de realimentación.

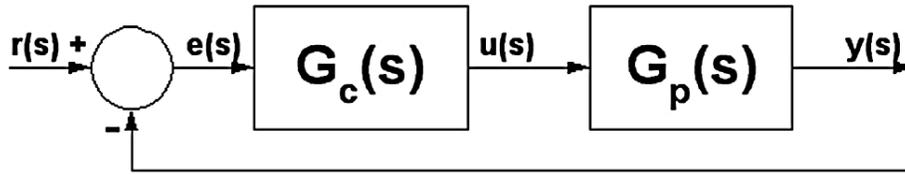
La función del elemento de realimentación es modificar la salida antes de compararla con la entrada. (Generalmente, el elemento de realimentación es un sensor que mide la salida de la planta. La salida del sensor se compara con la entrada y se genera la señal de error (pp. 64-65).

2.5.6. Identificación de procesos utilizando técnicas de lazo abierto

Alfaro (2011) afirma que para poder sintonizar el controlador $G_c(s)$ de un lazo de control, como el mostrado en la Figura 2.9, es necesario identificar primero la dinámica del proceso que se va a controlar $G_p(s)$, para luego obtener los parámetros del controlador, empleando el método de sintonización seleccionado. El proceso de sintonización del controlador consta así de dos etapas: identificación y sintonización (p. 11).

Figura 2.9

Sistema de control realimentado



Nota. Adaptado de “Identificación de procesos utilizando técnicas de lazo abierto” (p. 12), por V. M. Alfaro, 2011, *Revista Ingeniería de la Universidad de Costa Rica*, 11(1,2).

La obtención de la información dinámica del proceso requiere que éste sea excitado de alguna forma y que tanto la entrada aplicada así como la respuesta del proceso, sean registradas. Por estas razones resulta necesario realizar una prueba experimental que permita identificar un modelo dinámico para el proceso (Alfaro, 2011, p. 11).

Las técnicas de identificación experimental, que nos interesan, pueden clasificarse en:

- Métodos basados en la curva de reacción del proceso (respuesta al escalón)
- Métodos de oscilación mantenida
- Métodos de realimentación con relé
- Métodos de control P

Alfaro (2011) escribe que los métodos basados en la curva de reacción del proceso son métodos de lazo abierto, el controlador puede o no estar instalado y si lo está operará de modo “manual” durante la prueba (p. 11).

Las técnicas de identificación citadas anteriormente se basan, en consecuencia, en la curva de respuesta del proceso obtenida a lazo abierto o lazo cerrado y son procedimientos esencialmente gráficos (Alfaro, 2011, p. 11).

Modelos

Alfaro (2011) explica que la mayoría de los métodos de sintonización de controladores se basan en los parámetros de un modelo de orden reducido que permita representar sistemas dinámicos de orden alto y por esta razón los más empleados son los de primer o segundo orden más tiempo muerto (p. 12).

Función de transferencia

Primer orden más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} \quad (2.4)$$

Métodos basados en la curva de reacción del proceso

Restringiremos los métodos de identificación, así como los resultados obtenidos en su comparación, a aquéllos que permitan identificar un modelo de primer orden más tiempo muerto y en particular el siguiente:

- Métodos de dos puntos (Alfaro y Smith)

La curva de reacción del proceso se obtiene mediante una prueba de lazo abierto con el controlador manual y el sistema situados en el punto de operación deseado. En estas condiciones se aplica un cambio de escalón en la salida del controlador y se registra esta señal y la de salida del proceso, desde el instante en que se aplicó el escalón de entrada hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable, si este es un proceso auto-regulado (Alfaro, 2011, pp. 12-13).

Método de dos puntos

Alfaro (2011) escribe que para identificar dos de los parámetros que requiere el modelo, la constante de tiempo y el tiempo muerto aparente del sistema, se pueden establecer dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción. De este modo se garantiza que la respuesta del modelo coincida con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo (p. 15).

Método de Smith

El primer método basado en dos puntos sobre la curva de reacción fue propuesto por Smith. Los instantes seleccionados por este autor fueron los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% (t_{28}) y el 63.2% (t_{63}) del valor final, y corresponden a (Alfaro, 2011, p. 15):

$$t_{28} = t_m + \frac{\tau}{3} \quad (2.5)$$

$$t_{63} = t_m + \tau \quad (2.6)$$

Este sistema de ecuaciones se puede resolver para t_m y τ obteniéndose:

$$\tau = 1.5(t_{63} - t_{28}) \quad (2.7)$$

$$t_m = t_{63} - \tau \quad (2.8)$$

La ganancia es el cambio total en la salida dividido por el cambio en la entrada:

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2.9)$$

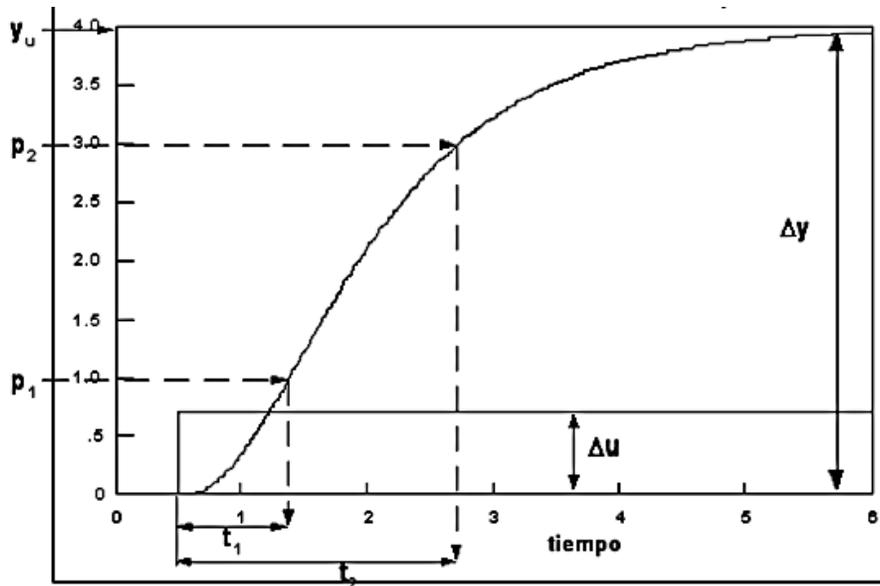
Si p_1 y p_2 son dos valores porcentuales del cambio en la respuesta del sistema a un cambio escalón en la entrada y t_1 y t_2 son los tiempos requeridos para alcanzar estos dos valores, como se muestra en la Figura 3.10, entonces los parámetros de un modelo de primer orden más tiempo muerto se pueden obtener de (Alfaro, 2011, p. 15):

$$\tau = at_1 + bt_2 \quad (2.10)$$

$$t_m = ct_1 + dt_2 \quad (2.11)$$

Figura 2.10

Método de dos puntos. Curva de reacción



Nota. Adaptado de "Identificación de procesos utilizando técnicas de lazo abierto" (p. 16), por V. M. Alfaro, 2011, *Revista Ingeniería de la Universidad de Costa Rica*, 11(1,2).

Los porcentajes del cambio en la respuesta para la determinación de los dos tiempos requeridos por el procedimiento de identificación, así como los valores de las constantes

a, b, c y d para los métodos de Alfaro y Smith, se resumen en la Tabla 1 (Alfaro, 2011, p. 16).

Tabla 2.1

Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.

Método	%p ₁ (t ₁)	%p ₂ (t ₂)	a	b	c	d
Smith	28.3	63.2	-1.50	1.50	1.50	-0.50
Alfaro	25.0	75.0	-0.910	0.910	1.262	-0.262

Nota. Adaptado de "Identificación de procesos utilizando técnicas de lazo abierto" (p. 16), por V. M. Alfaro, 2011, *Revista Ingeniería de la Universidad de Costa Rica*, 11(1,2).

2.6. Diseño de sistemas de control

Kuo (1996) explica que el diseño de sistemas de control involucra los tres pasos siguientes:

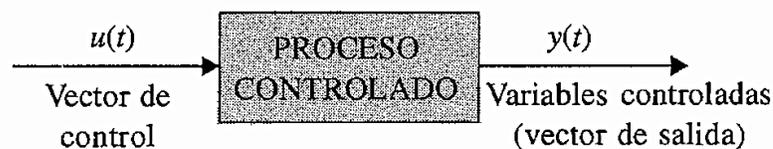
1. Determinar qué debe hacer el sistema y cómo hacerlo (especificaciones de diseño).
2. Determinar la configuración del compensador o controlador relativa a cómo está conectado al proceso controlado.
3. Determinar los valores de los parámetros del controlador para alcanzar los objetivos de diseño (p. 665).

2.6.1. Configuraciones del controlador

En general, la dinámica de un proceso lineal controlado puede representarse por el diagrama de bloques de la Figura 2.11.

Figura 2.11

Proceso controlado



Nota. Adaptado de *Proceso controlado* (p.665), por B. C. Kuo, 1996, Prentice Hall.

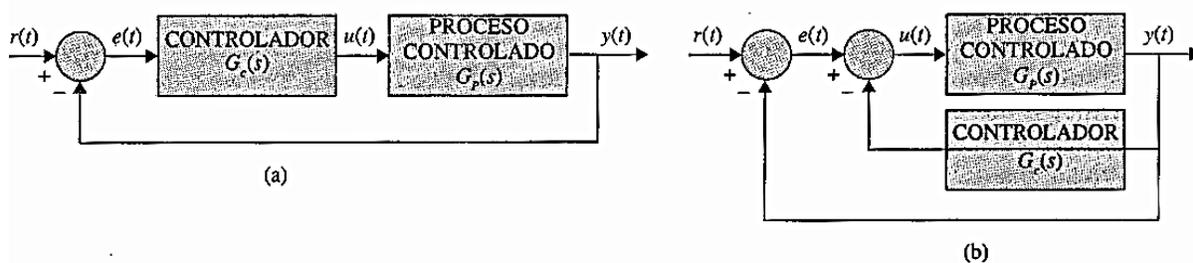
Kuo (1996) escribe que el objetivo de diseño es que las variables controladas, representadas por el vector de salida $y(t)$, se comporten en cierta forma deseada. El problema esencialmente involucra el determinar la señal de control $u(t)$ dentro de un intervalo prescrito para que todos los objetivos de diseño sean satisfechos (p. 667).

La mayoría de los métodos de diseño de sistemas de control convencionales se basan en el diseño de una configuración fija, en el que en un principio el diseñador decide la configuración básica del sistema diseñado completo y el lugar donde el controlador estará colocado en relación con el proceso controlado. El diseño general que emplea una configuración fija también es llamada compensación (Kuo, 1996, p. 667).

La Figura 2.12 ilustra varias configuraciones comúnmente empleadas con compensación controlador, las cuales se describen brevemente a continuación (Kuo, 1996, pp. 667-668).

Figura 2.12

Configuraciones de varios controladores en la compensación de sistemas de control. (a) Compensación en serie o cascada. (b) Compensación mediante realimentación.



Nota. Adaptado de Configuraciones de varios controladores en la compensación de sistemas de control (p.668), por B. C. Kuo, 1996, Prentice Hall.

- Compensación en serie (cascada). La Figura 2.12 (a) muestra la configuración del sistema más comúnmente utilizada con el controlador colocado en serie con el proceso controlado, y la configuración es llamada compensación en serie o en cascada.

- Compensación mediante realimentación. En la Figura 2.12 (b), el controlador está colocado en la trayectoria menor de realimentación y el esquema es llamado compensación mediante realimentación (Kuo, 1996, p. 668).

2.6.2. Tipos de controladores

Obando (2018) explica que un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación o error y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control.

Existen una variedad de controladores, entre los más usados a nivel industrial, se clasifican de la siguiente forma de acuerdo con sus acciones de control:

- a) De dos posiciones o de encendido y apagado (ON/OFF).
- b) Proporcionales.
- c) Integrales.
- d) Proporcionales-integrales.
- e) Proporcionales-derivativos.
- f) Proporcionales-integrales-derivativos.

Aunque también podrían clasificarse según la energía que utilizan para su operación como neumáticos, electrónicos e hidráulicos. Para el caso de estudio de la presente tesis se empleara un controlador tipo PID clasificado de acuerdo a sus acciones de control Proporcional-Integral-Derivativa, aplicado a un sistema de tipo térmico (Obando, 2018).

2.6.3. Principios fundamentales de diseño

Kuo (1996) escribe que una vez que se ha escogido una configuración del controlador, el diseñador debe escoger un tipo de controlador que con la selección adecuada de los valores de sus elementos satisficará todas las especificaciones de diseño. En la mayoría de los casos, mientras más complejo sea un controlador, es más costoso, menos

confiable, y más difícil de diseñar. El escoger un controlador determinado para una aplicación específica se basa a menudo en la experiencia del diseñador, y algunas veces en la intuición (p. 670).

Una vez elegido el controlador, la siguiente tarea es determinar los valores de los parámetros del controlador. Estos parámetros son típicamente coeficientes de una o más funciones de transferencia que componen al controlador (Kuo, 1996, p.670).

2.7. Controlador PID

2.7.1. Introducción al control PID

Amastegui (2001) afirma que los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden) (p. 1).

Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado (Amastegui, 2001).

Rodríguez (2018) escribe que el controlador PID, está basado en la retroalimentación de un bucle de control genérico, el cual calcula un valor "error" en base a la diferencia entre una variable medida y un valor deseado. Para optimizar el uso del controlador PID, las variables utilizadas para el cálculo deben ser ajustadas de acuerdo con el sistema a implementar. El cálculo del controlador PID involucra tres parámetros denominados: Proporcional, integral y derivado (pp. 19-20).

2.7.2. Teoría de Control PID

Bolton (2006) explica que el controlador proporcional derivativo (PID), mejor conocido como controlador de tres términos, con un sistema de la forma que se ilustra Figura 3.13 dará una salida, para una entrada de error e , de (p. 234)

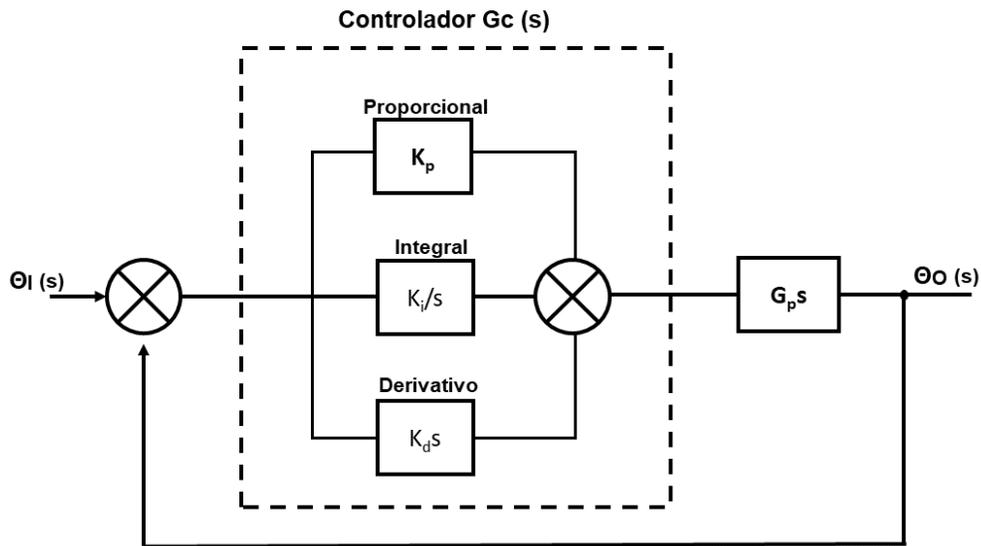
$$Salida = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.12)$$

La función de transferencia, salida (s)/ e(s), del controlador es, de esta manera

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.13)$$

Figura 2.13

Controlador PID



Nota. Adaptado de *Controlador PID* (p.235), por W. Bolton, 2006, Alfaomega.

Debido a que la constante de tiempo integral, τ_i , es $\frac{K_p}{K_i}$ y la constante de tiempo derivativa, $\tau_d \frac{K_d}{K_p}$, la ecuación se puede escribir como

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_d s}{K_p} \right) \quad (2.14)$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.15)$$

La función de transferencia en lazo abierto para el sistema de la Figura 3.13 es

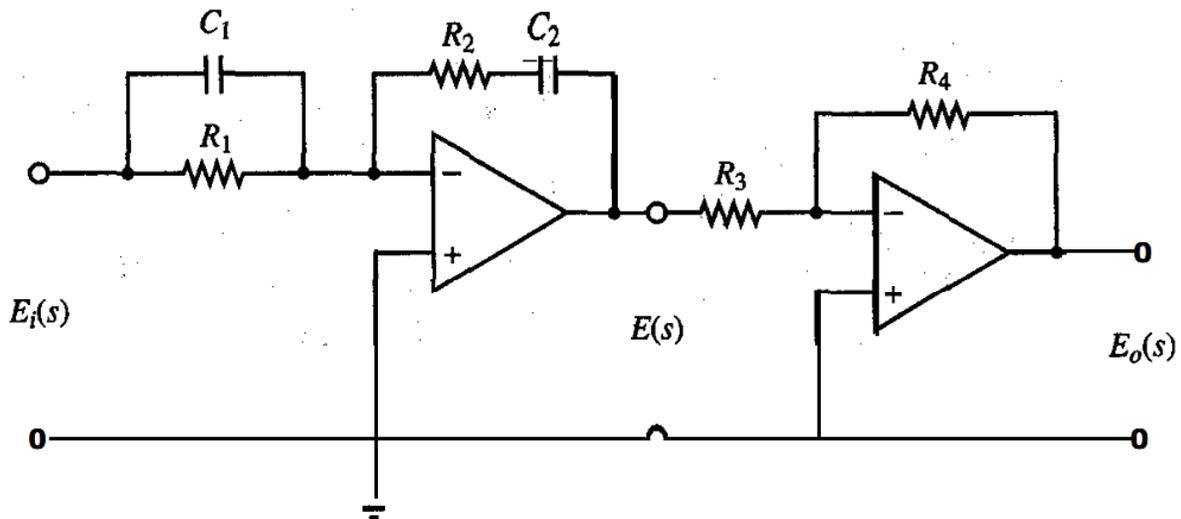
$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s) \quad (2.16)$$

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \quad (2.17)$$

De este modo, el controlador PID ha incrementado el número de ceros en 2 y el número de polos en 1. También el factor $1/s$ incrementa el tipo de sistema en 1 (Bolton, 2006, p. 235).

Figura 2.14

Controlador PID electrónico



Nota. Adaptado de Controlador PID electrónico (p.703), por K. Ogata, 2002, Pearson Education.

2.7.3. Funcionamiento

Ramírez Benavides (2017) afirma que para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos:

1. Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc).
2. Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
3. Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc) (p. 14).

El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o sistema. La señal puede representar

ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia (Ramírez Benavides, 2017, p.15).

El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de punto de consigna (o punto de referencia), la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor (Ramírez Benavides, 2017, p.15).

El controlador resta la señal de punto actual a la señal de punto de consigna, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (consigna) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID (Ramírez Benavides, 2017, p.16).

Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser transformada para ser compatible con el actuador utilizado (Ramírez Benavides, 2017, p.16).

Los tres componentes de un controlador PID son: parte Proporcional, acción Integral y acción Derivativa. El peso de la influencia que cada una de estas partes tiene en la suma final, viene dado por la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo, respectivamente. Se pretenderá lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo posible los efectos de las perturbaciones (Ramírez Benavides, 2017, p.17).

Acción proporcional

Ramírez Benavides (2017) explica que la parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional, para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo. Existe también un valor límite en la constante proporcional a

partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados (p. 18).

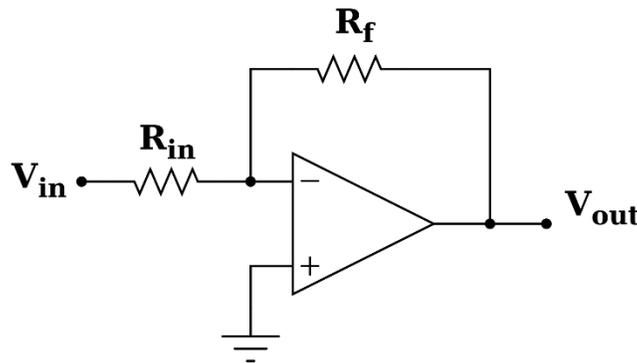
La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa (Energisa, 2009 citado por Torres Capuz, J.L. & Chanoluisa Martínez S. X., 2015, p.17).

La fórmula del proporcional está dada por: $P_{sal} = K_p e(t)$ (2.18)

Bañuelos Saucedo (1999) escribe que la etapa proporcional de un controlador es la etapa más simple, ya que consiste en un amplificador con una ganancia (K_p). Su función es aumentar la velocidad de respuesta y reducir el error en estado estacionario del sistema. Esta etapa se puede implementar fácilmente mediante una configuración inversora como la mostrada en la figura 2.14 (p. 3).

Figura 2.15

Configuración inversora



Nota. Adaptado de *Amplificador operacional inversor* [Fotografía], por Hernández M., 2019, Flickr (<https://www.amplificadoroperacional.com/inversor/>). CC BY 2.0

Acción integral

Ramírez Benavides (2017) explica que el modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional.

El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; Luego es multiplicado por una constante K_i . Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario (p.20).

El control integral se utiliza para obviar el inconveniente del offset (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional (Ramírez Benavides, 2017, p.21).

La fórmula del integral está dada por: $I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$ (2.19)

Bañuelos Saucedo (1999) escribe que la etapa integradora le añade capacidad de procesamiento temporal al controlador. Esencialmente se trata de una etapa que guardará una historia de la magnitud del error y contribuirá a reducir a cero el error en estado estacionario (p. 3).

Acción derivativa

Ramírez Benavides (2017) expresa que la acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral) (p. 22).

El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor consigna, o "Set Point".

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente (Ramírez Benavides, 2017, p.22).

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante D y luego se suma a las señales anteriores (P+I). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios

en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente.

La fórmula del derivativo está dada por: $D_{sal} = K_d \frac{de}{dt}$ (2.20)

Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso. Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva. El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones (Energisa, 2009 citado por Torres Capuz, J.L. & Chanoluisa Martínez S. X., 2015, p. 20).

Significado de las constantes

Ramírez Benavides (2017) escribe que la constante de proporcionalidad (K_p): se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional (p. 24).

- K_i constante de integración: indica la velocidad con la que se repite la acción proporcional.
- K_d constante de derivación: hace presente la respuesta de la acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El valor indicado por la constante de derivación es el lapso durante el cual se manifestará la acción proporcional correspondiente a 2 veces el error y después desaparecerá (Ramírez Benavides, 2017, p.24).

2.7.4. Ajuste de parámetros del PID

El objetivo de los ajustes de los parámetros PID es lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el mínimo tiempo los efectos de las perturbaciones; se tiene que lograr la mínima integral de error. Si los parámetros del controlador PID (la ganancia del proporcional, integral y derivativo) se eligen incorrectamente, el proceso a controlar puede ser inestable (Controlador PID, 2010, p. 4).

Ajustar un lazo de control significa ajustar los parámetros del sistema de control a los valores óptimos para la respuesta del sistema de control deseada. El comportamiento óptimo ante un cambio del proceso o cambio del “setpoint” varía dependiendo de la aplicación (Controlador PID, 2010, p. 4).

Hay varios métodos para ajustar un lazo de PID. El método más efectivo generalmente requiere del desarrollo de alguna forma del modelo del proceso, luego elegir P, I y D basándose en los parámetros del modelo dinámico. Los métodos de ajuste manual pueden ser muy ineficientes (Controlador PID, 2010, p. 4).

Ambriz Polo (2015) explica que existen diversos métodos para la sintonización de los parámetros de un controlador tipo PID desde sintonización manual basada en la observación, hasta métodos más sobresalientes, basados en las respuestas gráficas de los sistemas, tal es el caso del método gráfico Ziegler-Nichols el cual logra sintonizar los parámetros del controlador, pero no encontrar los parámetros óptimos para el mismo (p.36).

Método de Ziegler Nichols

Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID, en base a la respuesta experimental al escalón o en base al valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (Por supuesto, estas reglas se aplican al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos) (Ogata, 2002).

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 de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID la realizan los ingenieros en el sitio mediante experimentos sobre la planta (Ogata, 2002).

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. En ambos se pretende obtener un 25% de sobrepaso máximo en la respuesta escalón (Ogata, 2002).

Método de la curva de reacción

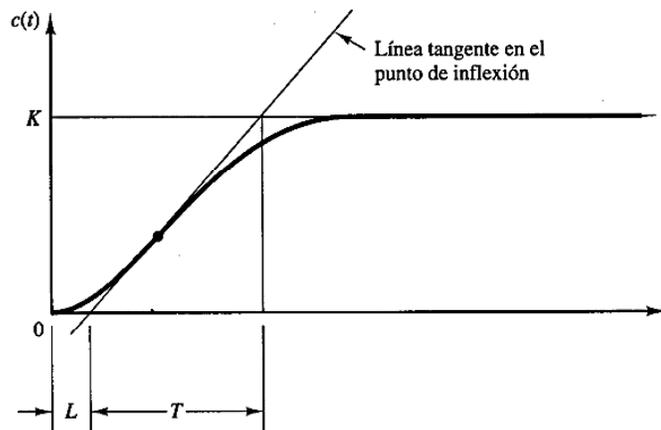
En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 2.16. (Si la respuesta no exhibe una curva con forma de S, este método no es pertinente.) (Ogata, 2002).

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 L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$, como se aprecia en la figura 2.16. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte del modo siguiente (Ogata, 2002):

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.21)$$

Figura 2.16

Determinación de parámetros para el diseño del controlador.



Nota. Adaptado de *Curva de respuesta con forma de S* (p. 671), por K. Ogata, 2002, Pearson Education.

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con las fórmulas que aparecen en la Tabla 3 (Ogata, 2002).

Tabla 3

Reglas de sintonización Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

El controlador PID sintonizado mediante este método de la ecuación

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.22)$$

produce:

$$1.2 \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (2.23)$$

$$0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (2.24)$$

Por lo tanto el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -1/L$ (Ogata, 2002, p.672).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Representación estadística

Para la realización de este proyecto se realizó una búsqueda en diferentes bases de datos públicas para conocer el producto que más se produce en el estado de Puebla y también sobre la temperatura adecuada que se debe mantener en el proceso de deshidratación, para ello se realizó un pequeño análisis estadístico.

3.2. Fuentes de Información

Las principales fuentes de información que sirvieron como base para la realización de este proyecto fueron libros enfocados a la teoría de control y tesis referentes a la innovación en el campo de deshidratadores solares y el diseño de controladores PID de temperatura.

3.3. Técnicas e instrumentos

Las principales técnicas utilizadas para el desarrollo del proyecto fueron algunas técnicas de control clásico para sintonizar controladores, etc.

El software utilizado en el desarrollo de este proyecto se presenta a continuación.

Software Matlab

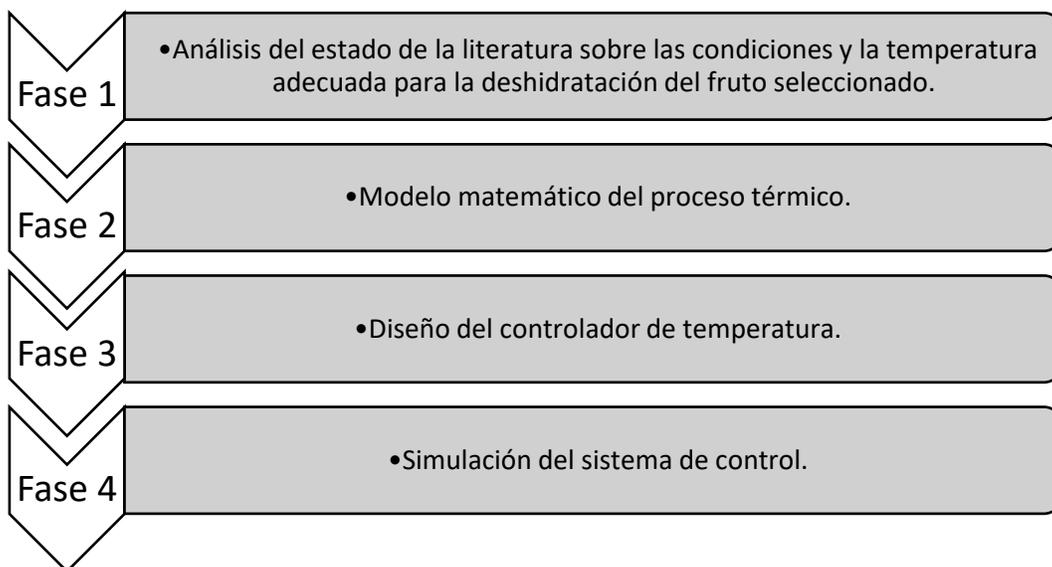
Matlab cuya abreviatura es (MATrix LABoratory o Laboratorio de matrices), como un sistema de cómputo numérico, que maneja un lenguaje propio y de alto nivel (lenguaje M) para cálculos científicos y de ingeniería, sirve para analizar y diseñar sistemas y productos, y está presente en sistemas de seguridad, naves espaciales, dispositivos de monitorización de salud, también se utiliza para el procesamiento de señales, imágenes, comunicaciones, robótica, entre otros campos. Está disponible para plataformas como Unix, Windows, Mac, Linux (The MathWorks, 2019).

Proteus

Proteus es un sistema completo de diseño electrónico que combina un avanzado programa de captura de esquemas, un sistema de simulación mixto (analógico y digital) basado en Spice, y un programa para disposición de componentes en placas de circuito impreso y auto-ruteado. Se trata de un software comercial fabricado por Labcenter Electronics, caracterizado por su potencia y facilidad de uso. La razón principal que nos condujo a experimentar con Proteus fue su capacidad para simular circuitos basados en amplificadores operacionales, con toda la electrónica que los rodea (Barrón Ruíz, 2018).

3.4. Procedimientos

Para el logro del objetivo general se propone una solución en cuatro fases: 1. Análisis del estado de la literatura sobre las condiciones y la temperatura adecuada para la deshidratación del fruto seleccionado; 2. El modelo matemático del proceso; 3 y 4. El diseño y la simulación del control PID aplicado al sistema térmico.



En la primera fase se analizaron datos estadísticos de tres investigaciones encontrando similitudes en la temperatura adecuada para que el proceso de deshidratado se realice de manera correcta sin perjudicar el fruto.

Para la segunda fase, se investigaron las leyes físicas que intervienen el proceso para realizar el modelado matemático considerando todas las variables.

Finalmente, para la tercera y cuarta fase, se utilizó el modelo matemático obtenido anteriormente para calcular los componentes del controlador y se realizó la simulación en el software especializado para corroborar su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

Las investigaciones revisadas en el Capítulo II concuerdan con que las temperaturas adecuadas para el secado correcto de la pera son de 50 °C a 70°C como máximo, evitando así que se modifiquen las características tisulares y que se presenten problemas de formación de corteza. Así que se eligió una temperatura de 65°C como señal de referencia del controlador.

La automatización del sistema se realizó en dos fases: la primera consistió en la identificación de la dinámica de la planta y la segunda en la sintonización del controlador PID, para ello se utilizaron plataformas de análisis y simulación, como MatLab, Scilab y Proteus.

La teoría matemática del modelado para el sistema térmico se basó principalmente en la ley de enfriamiento de Newton de la convección del calor (Cengel, 2007), derivando en una función de transferencia de primer grado de la planta a controlar

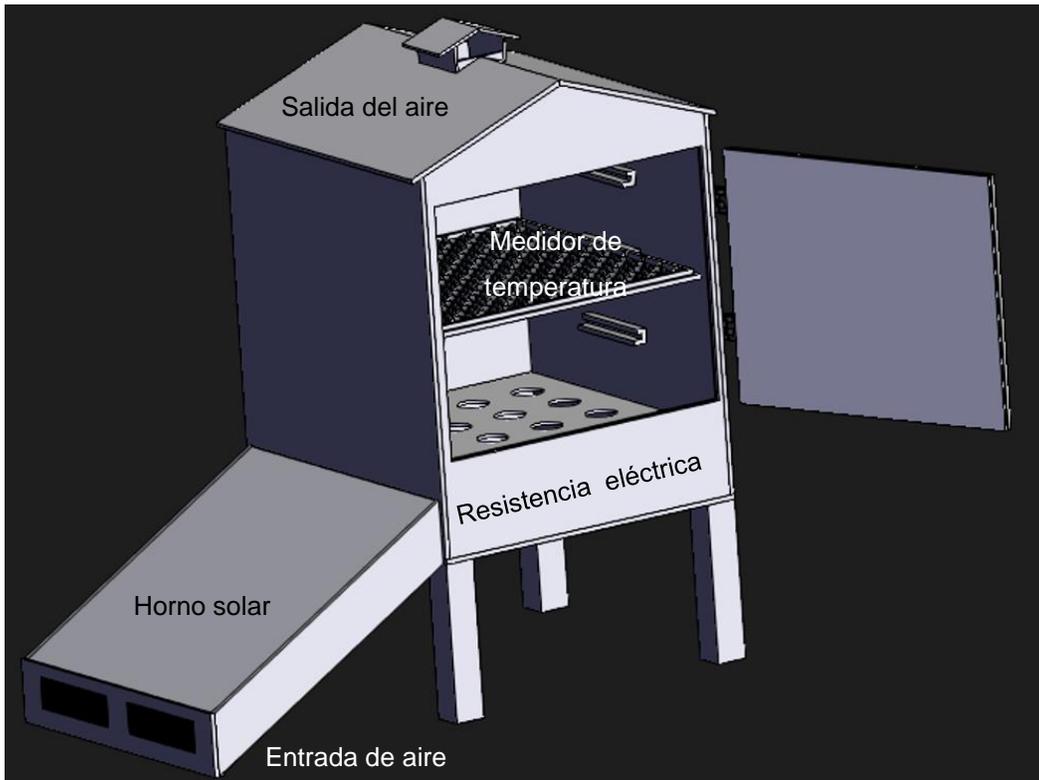
$$G(s) = \frac{1}{RCS+1} \quad (4.1)$$

El diseño del sistema de control automático se basó en una estructura similar a la de la imagen de la Figura 4.1, proporcionado por la guía del deshidratador solar de SEMARNAT (2008), donde se describe de manera gráfica las partes que componen el deshidratador solar con un colector para aumentar de manera natural la temperatura y unas rendijas para que exista el flujo del aire.

La resistencia (horno eléctrico) se colocará debajo de las charolas donde se sitúan los frutos para elevar la temperatura del aire únicamente cuando el horno solar no sea capaz de proveerla.

Figura 4.1

Modelo del deshidratador solar

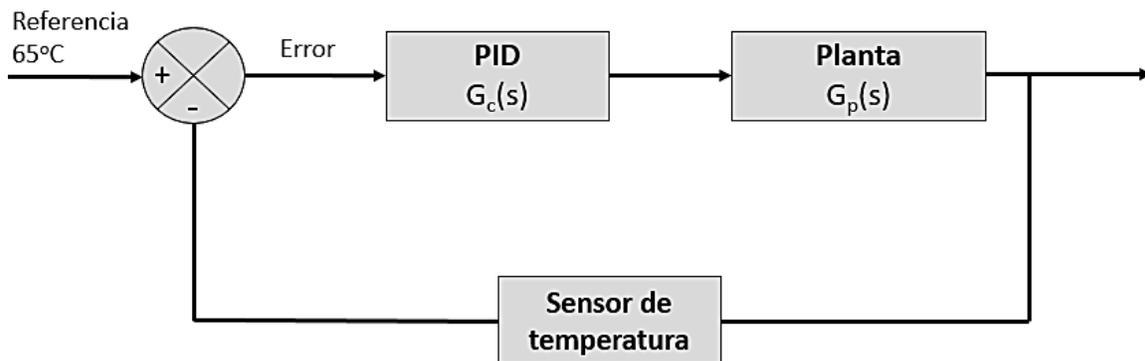


La señal de referencia del controlador solar es de 65°C, mientras sea posible conseguir esta temperatura no se activará el horno eléctrico, pero cuando no se alcancen los 65°C se activará siendo la fase del control la que dicte con cuanta temperatura iniciará el horno eléctrico, logrando así la temperatura deseada.

La Figura 4.2 muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

Figura 4.2

Diagrama de bloques del sistema de control



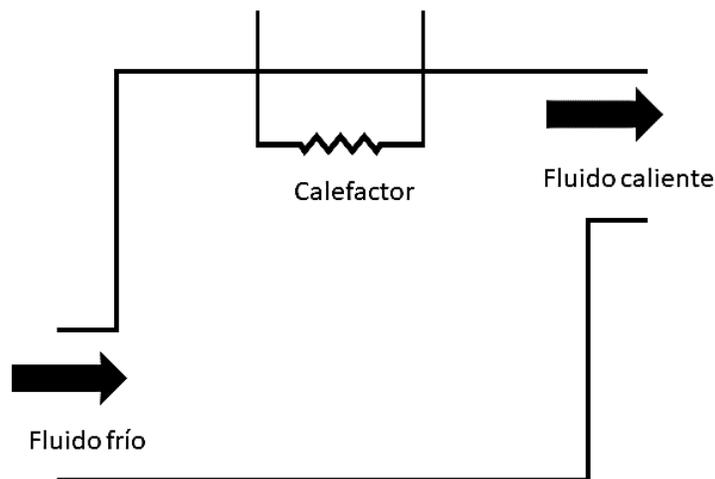
Modelado de la planta

Para realizar el modelado matemático de la planta se consideró el modelo de transferencia de calor que se muestra en la Figura 4.3.

Para ello se supuso que el deshidratador está aislado para eliminar las pérdidas de calor hacia el aire circundante. También se supone que no hay almacenamiento de calor en el aislamiento y que el fluido del contenedor está perfectamente mezclado, por lo que tiene una temperatura estable. De este modo, se usa una sola temperatura para describir la del fluido en el contenedor y la del fluido que sale.

Figura 4.3

Sistema térmico.



Se supone que la temperatura del fluido que entra se mantiene constante y que el flujo de calor de entrada al sistema (el calor que proporciona la resistencia del horno eléctrico), cambia repentinamente de \bar{H} a $\bar{H} + h_i$ en donde h_i representa un cambio pequeño en el flujo de calor de entrada, entonces el flujo de calor de salida cambiará de \bar{H} a $\bar{H} + h$. La temperatura del fluido que sale también cambiará de $\bar{\theta}_0$ a $\bar{\theta}_0 + \theta$.

Entonces

$\bar{\theta}_i$ = Temperatura en estado estable del aire que entra, °C

$\bar{\theta}_o$ = Temperatura en estado estable del aire que sale, °C

G = Velocidad de flujo del aire en estado estable, kg/seg

M = Masa del aire, kg

c = Calor específico, kcal/kg °C

R = Resistencia térmica, °Cseg/kcal

C = Capacitancia térmica, kcal/°C

H = Entrada de flujo de calor en estado estable, kcal/ seg.

$$h_o = Gc\theta \quad (4.1)$$

$$C = Mc \quad (4.2)$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (4.3)$$

La ecuación diferencial del horno es

$$Cd\theta = (Gc\theta_i - h_o)dt \quad (4.4)$$

Despejando $Gc\theta_i - h_o$

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_i - h_o \quad (4.5)$$

Que por 5.3 y 5.1 puede reescribirse como

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R}\theta_i - Gc\theta \quad (4.6)$$

Por 5.3 se obtiene

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R}\theta_i - \frac{1}{R}\theta \quad (4.7)$$

Factorizando 1/R

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R}(\theta_i - \theta) \quad (4.8)$$

$$RC \frac{d\theta}{dt} = \theta_i - \theta \quad (4.9)$$

Despejando

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_i \quad (4.10)$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtiene

$$RCs\theta(s) + \theta(s) = \theta_i(s) \quad (4.11)$$

Entonces la función de transferencia del sistema es:

$$(RCs + 1)\theta(s) = \theta_i(s) \quad (4.12)$$

$$RCs + 1 = \frac{\theta_i(s)}{\theta(s)} \quad (4.13)$$

$$\frac{\theta(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{RCs+1} \quad (4.14)$$

Multiplicando por la función desplazada en el tiempo.

$$F(s) = \delta[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt = \frac{1}{RCs+1} e^{-st} \quad (4.15)$$

Así llegamos a la G(s) de un sistema de 1^{er} orden con retardo en el tiempo que definirá la planta del Horno eléctrico:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (4.16)$$

Donde

K: Ganancia estática. Es la ganancia o amplificación del sistema para una entrada constante (ganancia DC).

L: (dead time). Es el tiempo que transcurre desde que provoca un cambio en la entrada hasta que aparece algún cambio en la salida

T= Tiempo característico del sistema de primer orden. Esto se refiere a la relación del retardo a la salida con respecto a una variación de la entrada.

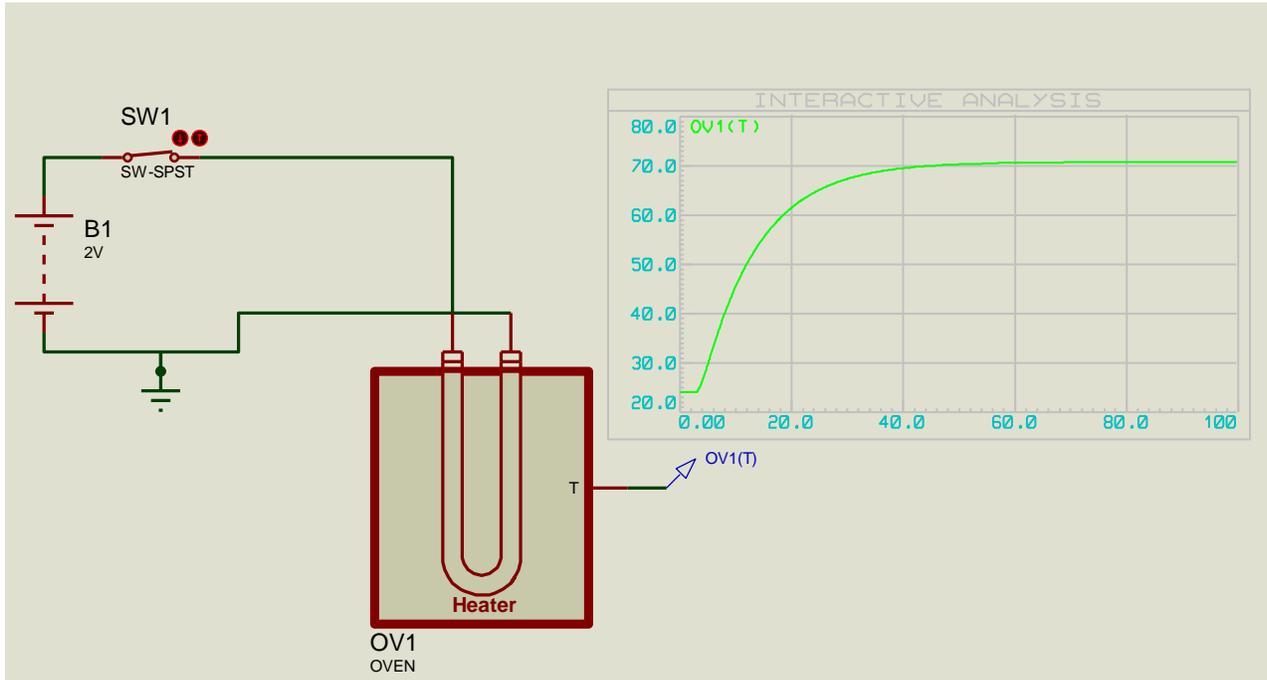
Una vez conocido el comportamiento de la planta como una función de transferencia de 1er Orden. Se procedió a simular en la plataforma Proteus como se muestra en la (Figura 4.4), esto para posteriormente obtener los parámetros de la función de transferencia.

La temperatura máxima alcanzada $C(t)_{final}$ por el sistema fue de 70.8°C

La temperatura inicial fue de $C(t)_{inicial}$ fue de 24°C

Figura 4.4

Entrada escalón en bucle abierto



A continuación se procedió a identificar los parámetros K, L y T del sistema de primer orden. Para ello se utilizó el método de Smith de los dos puntos.

Temperatura de $t_{28.3\%}$: 37.24°C a 7.11s

Temperatura de $t_{63.2\%}$: 53.58°C a 13.85s

Utilizando las fórmulas 3.9, 3.10 y 3.11 se obtiene:

$$K = \frac{C(t)_{final} - C(t)_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}} = \frac{70.8^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C}}{2 - 0} = 23.4 \quad (4.17)$$

$$T = at_1 + bt_2 = (-1.5)(7.11) + (1.5)(13.85) = 10.11 \quad (4.18)$$

$$L = ct_1 + dt_2 = (1.5)(7.11) + (-0.5)(13.85) = 3.74 \quad (4.19)$$

Entonces, la función de transferencia de la planta queda como:

$$G_p(s) = \frac{23.4e^{-3.74s}}{10.11s + 1} \quad (4.20)$$

Por lo tanto tiene un polo en

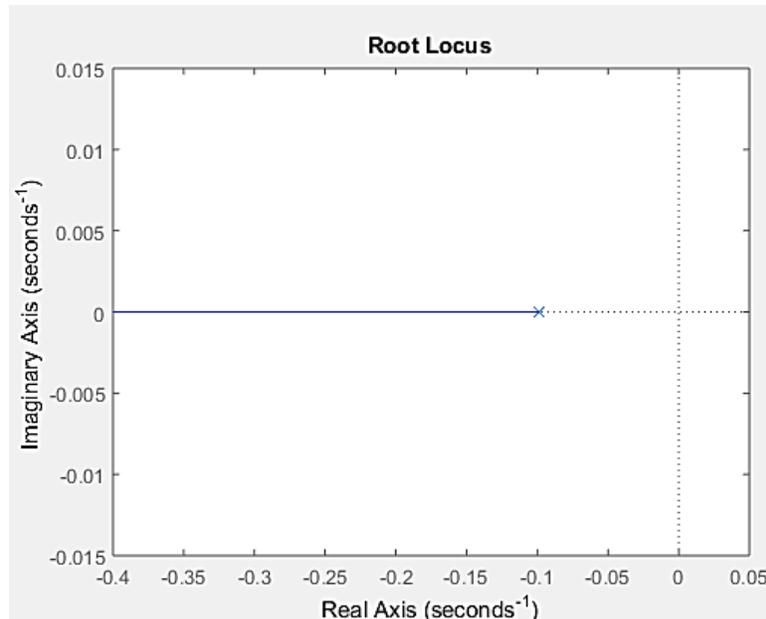
$$10.11s + 1 = 0 \quad (4.21)$$

$$s = -\frac{1}{10.11}$$

Así que al estar graficado en el lado izquierdo del plano complejo, el proceso es estable (Véase Figura 4.5).

Figura 4.5

Polo de la función de transferencia en el plano complejo (Método de Smith).



A continuación se presenta la función de transferencia de la planta obtenida por medio de Matlab, esto con el fin de comprobar la validez de los parámetros obtenidos de manera manual.

Para ello se utilizó el siguiente código y la opción Plant Identification de Matlab

Figura 4.6

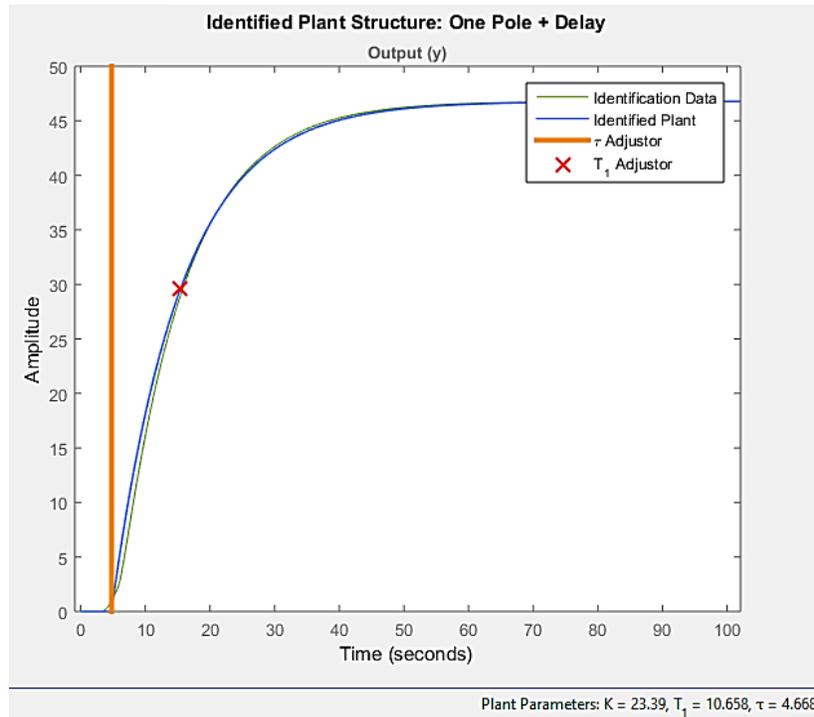
Código en Matlab para la identificación de la planta.

```
clear all
clc
ti=xlsread('TEMPERATURA.xlsx','A2:A929');
te=xlsread('TEMPERATURA.xlsx','B2:B929');

datos = iddata (te, ti, 0.11);
```

Figura 4.7

Identificación de la función de transferencia de la planta por medio de Plant Identification



Los parámetros obtenidos son los siguientes:

$$K = 23.39$$

$$T = 10.658$$

$$L = 4.6687$$

Entonces la función de transferencia resultante es:

$$G_p(s) = \frac{23.39e^{-4.6687s}}{10.658s+1} \quad (4.22)$$

Por lo tanto tiene un polo en

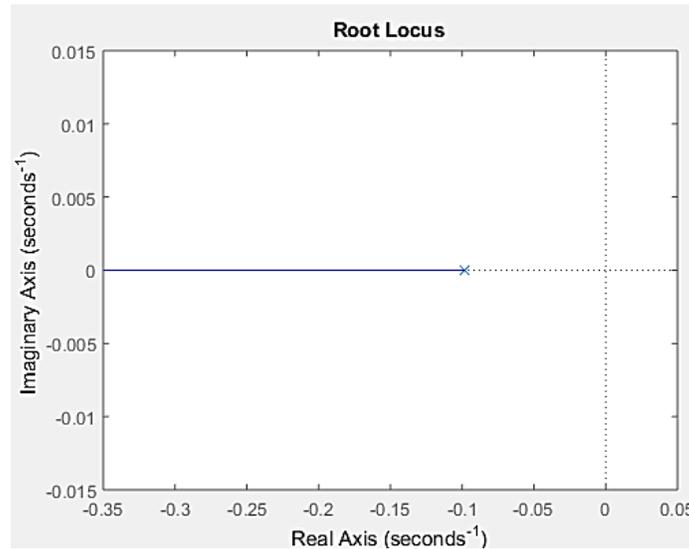
$$10.658s + 1 = 0 \quad (4.23)$$

$$s = -\frac{1}{10.658}$$

Al igual que en la Función de transferencia obtenida por el método de Smith, el polo se encuentra en el lado izquierdo del plano complejo (Véase Figura 4.8).

Figura 4.8

Polo de la función de transferencia en el plano complejo (por medio de Plant Identification).



Una vez conocidos estos parámetros, se procedió a obtener los parámetros del controlador PID por medio de las reglas de Ziegler-Nichols.

Método de Smith

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \left(\frac{10.11}{3.74} \right) = 3.24 \quad (4.24)$$

$$T_i = 2L = 2(3.74) = 7.48 \quad (4.25)$$

$$T_d = 0.5L = 0.5(3.74) = 1.87 \quad (4.26)$$

Entonces

$$K_p = 3.24$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{3.24}{7.48} = 0.43 \quad (4.27)$$

$$K_d = K_p * \tau_d = (3.24)(1.87) = 6.06 \quad (4.28)$$

Parámetros obtenidos por medio de Plant Identification

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \left(\frac{10.658}{4.6687} \right) = 2.283 \quad (4.29)$$

$$T_i = 2L = 2(4.6687) = 9.3374 \quad (4.30)$$

$$T_d = 0.5L = 0.5(4.6687) = 2.3343 \quad (4.31)$$

Entonces

$$K_p = 2.283$$

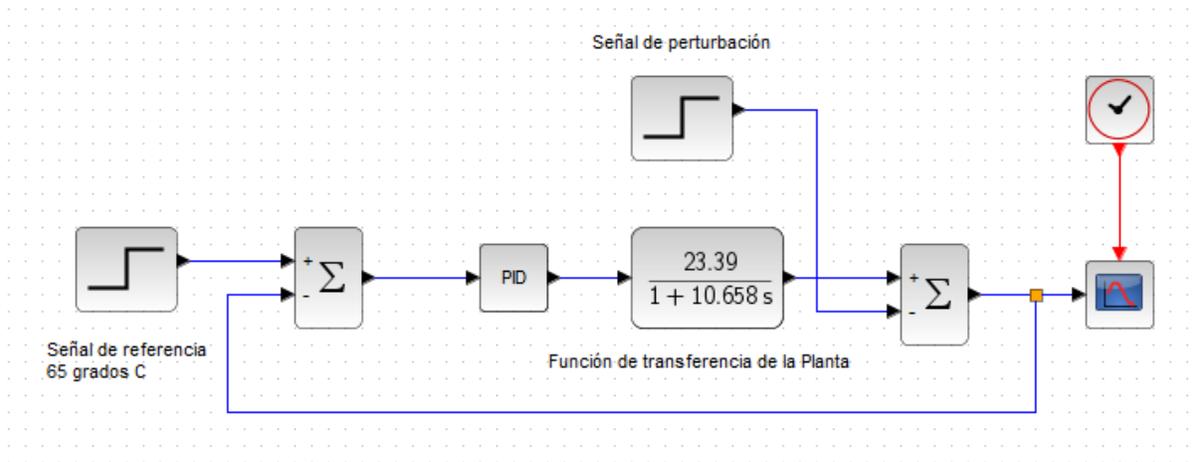
$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{2.283}{9.3374} = 0.24 \quad (4.32)$$

$$K_d = K_p * \tau_d = (2.283)(2.3343) = 5.3292 \quad (4.33)$$

Se realizó el sistema de control en Scilab como se muestra en la Figura 4.9.

Figura 4.9

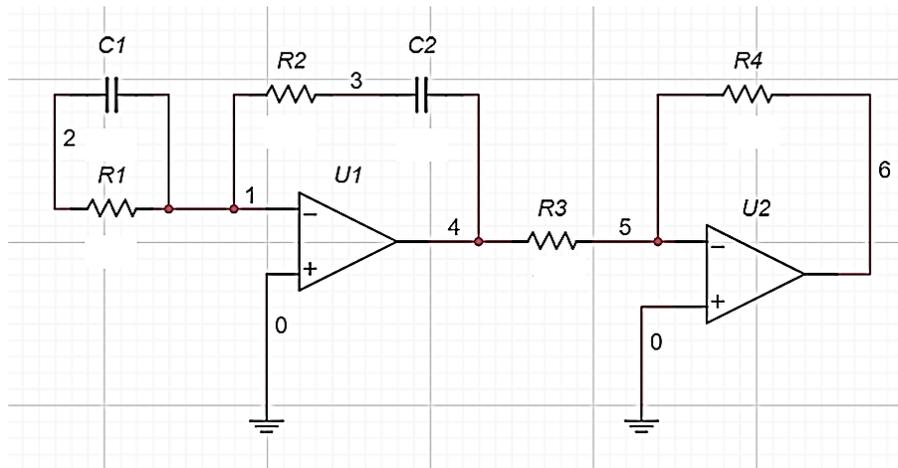
Sistema de control en Xcos Scilab.



El diseño del controlador PID electrónico es el que aparece a continuación

Figura 4.10

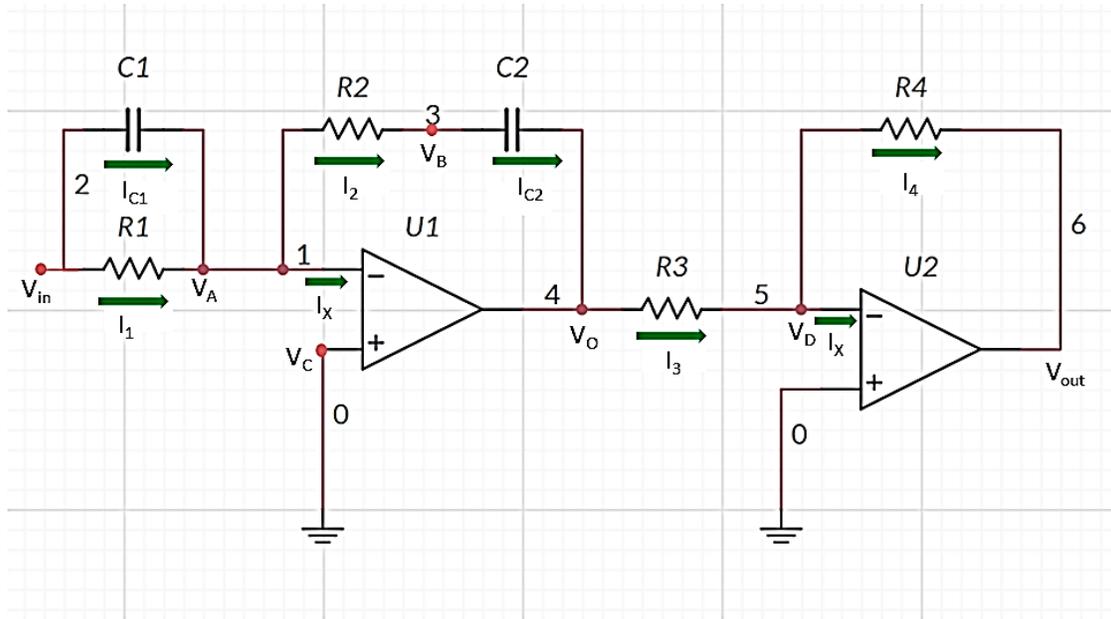
Sistema de control analógico en Multisim.



Función de transferencia del control PID

Figura 4.11

Determinación de los componentes del sistema de control analógico.



Nodo V_A

$$I_{C1} + I_1 = I_x + I_2 \quad (4.34)$$

$$I_x = 0 \quad (4.35)$$

$$I_{C1} + I_1 = I_x + I_2 \quad (4.36)$$

$$I_{C1} + I_1 = I_2 \quad (4.37)$$

$$\bullet \quad I_{C1} = C_1 \frac{d}{dt}(V_{in} - V_A) \quad (4.38)$$

$$\bullet \quad I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2} \quad (4.39)$$

$$\bullet \quad I_1 = \frac{V_{in} - V_A}{R_1} \quad (4.40)$$

Entonces

$$C_1 \frac{d}{dt}(V_{in} - V_A) + \frac{V_{in} - V_A}{R_1} = \frac{V_A - V_B}{R_2} \quad (4.41)$$

$$\bullet V_A = V_C = 0V \quad (4.42)$$

Por lo tanto

$$C_1 \frac{d}{dt}(V_{in}) + \frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_B}{R_2} \quad (4.43)$$

$$V_B = -(R_2 C_1 \frac{d}{dt} V_{in} + \frac{R_2}{R_1} V_{in}) \quad (4.44)$$

$$V_B(s) = -(R_2 C_1 S V_{in}(s) + \frac{R_2}{R_1} V_{in}(s)) \quad (4.45)$$

$$V_B(s) = -V_{in}(s) \left[R_2 C_1 S + \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (4.46)$$

Nodo V_B

$$I_2 = I_{C2} \quad (4.47)$$

$$I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2} \quad (4.48)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{d}{dt}(V_B - V_0) \quad (4.49)$$

Entonces

$$\frac{V_A - V_B}{R_2} = C_2 \frac{d}{dt}(V_B - V_0) \quad (4.50)$$

Transformada de Laplace

$$-\frac{V_B(s)}{R_2} = C_2 S (V_B(s) - V_0(s)) \quad (4.51)$$

$$-\frac{V_B(s)}{R_2} = C_2 S V_B(s) - C_2 S V_0(s) \quad (4.52)$$

$$-V_B(s) = R_2 C_2 S V_B(s) - R_2 C_2 S V_0(s) \quad (4.53)$$

$$R_2 C_2 S V_0(s) = V_B(s) [R_2 C_2 S + 1] \quad (4.54)$$

$$V_0(s) = \frac{R_2 C_2 S + 1}{R_2 C_2 S} V_B(s) \quad (4.55)$$

Sustituyendo $V_B(s)$ en $V_0(s)$

$$V_0(s) = -\left(\frac{R_2 C_2 S + 1}{R_2 C_2 S} \right) \left(R_2 C_1 S + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{in}(s) \quad (4.56)$$

Nodo V_D

$$I_3 = I_x + I_4 \quad (4.57)$$

$$\bullet I_x = 0 \quad (4.58)$$

$$\bullet I_3 = \frac{V_o - V_D}{R_3} \quad (4.59)$$

$$\bullet I_4 = \frac{V_D - V_{out}}{R_4} \quad (4.60)$$

$$\bullet V_D = 0 \quad (4.61)$$

$$\frac{V_o - V_D}{R_3} = \frac{V_D - V_{out}}{R_4} \quad (4.62)$$

$$\frac{V_o}{R_3} = -\frac{V_{out}}{R_4} \quad (4.63)$$

Transformada de Laplace

$$\frac{V_o(s)}{R_3} = -\frac{V_{out}(s)}{R_4} \quad (4.64)$$

$$V_{out}(s) = -V_o(s) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4.63)$$

$$V_{out}(s) = V_o(s) = \left(\frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2 C_2 s} \right) \left(R_2 C_1 s + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) V_{in}(s) \quad (4.65)$$

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (5.66)$$

$$G(s) = \left(\frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2 C_2 s} \right) \left(R_2 C_1 s + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (5.67)$$

$$G(s) = \left(R_2 C_1 s + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_2 s} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4.68)$$

$$G(s) = (R_2 C_1 s) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + \left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + \left(\frac{1}{R_1 C_2 s} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4.69)$$

$$G(s) = \left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) + \left(\frac{1}{R_1 C_2} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \left(\frac{1}{s} \right) + (R_2 C_1) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) s \quad (4.70)$$

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.71)$$

Entonces

$$\bullet K_p = \left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \quad (4.72)$$

$$\bullet K_i = \left(\frac{1}{R_1 C_2} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) = \frac{R_4}{R_3 R_1 C_2} \quad (4.73)$$

$$\bullet K_d = (R_2 C_1) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) = \frac{R_4 R_2 C_1}{R_3} \quad (4.74)$$

$$G(s) = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} + \frac{R_4}{R_3 R_1 C_2 s} + \frac{R_4 R_2 C_1}{R_3} s \quad (4.75)$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{\frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2}}{\frac{R_4}{R_3 R_1 C_2}} = R_1 C_1 + R_2 C_2 \quad (4.76)$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p} = \frac{\frac{R_4 R_2 C_1}{R_3}}{\frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2}} = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \quad (4.77)$$

Expresada de la forma

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (4.78)$$

Se obtiene

$$G(s) = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \left(1 + \frac{1}{(R_1 C_1 + R_2 C_2) s} + \left(\frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \right) s \right) \quad (4.79)$$

Entonces

$$K_p = \frac{R_4 (R_1 C_1 + R_2 C_2)}{R_3 R_1 C_2} \quad (4.80)$$

$$\tau_i = R_1 C_1 + R_2 C_2 \quad (4.81)$$

$$\tau_d = \frac{R_1 C_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 + R_2 C_2} \quad (4.82)$$

A partir de esto se tiene $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

Entonces

$$K_p = \frac{R_1 (R_1 C_1 + R_1 C_2)}{R_1 R_1 C_2} = \frac{(R_1)^2 (C_1 + C_2)}{(R_1)^2 C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_2} = 1 + \frac{C_1}{C_2} \quad (4.83)$$

$$K_i = \frac{R_1}{R_1 R_1 C_2} = \frac{1}{R C_2} \quad (4.84)$$

$$K_d = \frac{R_1 R_1 C_1}{R_1} = R C_1 \quad (4.85)$$

Método de Smith

Considerando los resultados τ_i y τ_d , se calculan K_i y K_d

$$K_p = 3.24 \quad (4.86)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{3.24}{7.48} = 0.43 \quad (4.87)$$

$$K_d = K_p * \tau_d = (3.24)(1.87) = 6.06 \quad (4.88)$$

Entonces

$$R = 100K\Omega \quad (4.89)$$

$$K_d = RC_1 = 6.06 \quad (4.90)$$

$$C_1 = \frac{6.06}{R} = \frac{6.06}{100K\Omega} = 60.6 \mu F \quad (4.91)$$

$$K_i = \frac{1}{R C_2} = 0.43 \quad (4.92)$$

$$C_2 = \frac{1}{0.43R} = \frac{1}{0.43*100K\Omega} = 23.3 \mu F \quad (4.93)$$

Datos de Plant Identification

$$K_p = 2.283$$

$$K_i = 0.24$$

$$K_d = 5.3292$$

Entonces

$$R = 100K\Omega \quad (4.94)$$

$$K_d = RC_1 = 5.3292 \quad (4.95)$$

Utilizando 5.93 y 5.94, se tiene que

$$C_1 = \frac{5.3292}{R} = \frac{5.097}{100K\Omega} = 53.292 \mu F \quad (4.96)$$

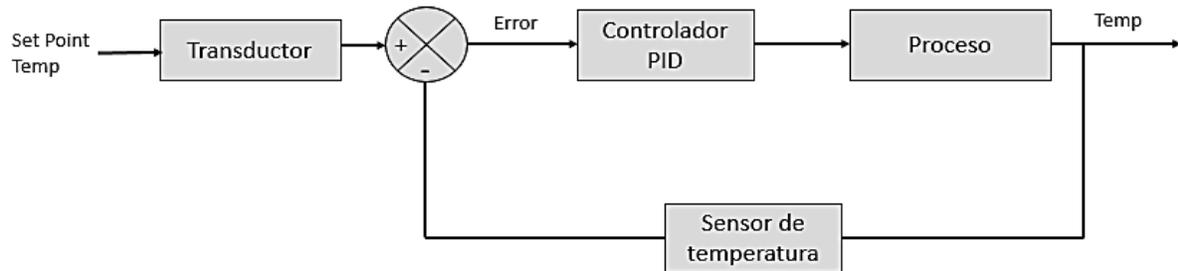
$$K_i = \frac{1}{R C_2} = 0.24 \quad (4.97)$$

$$C_2 = \frac{1}{0.24R} = \frac{1}{0.24*100K\Omega} = 41.667 \mu F \quad (4.98)$$

El esquema del sistema de control se presenta a continuación (Ver Figura 4.12).

Figura 4.12

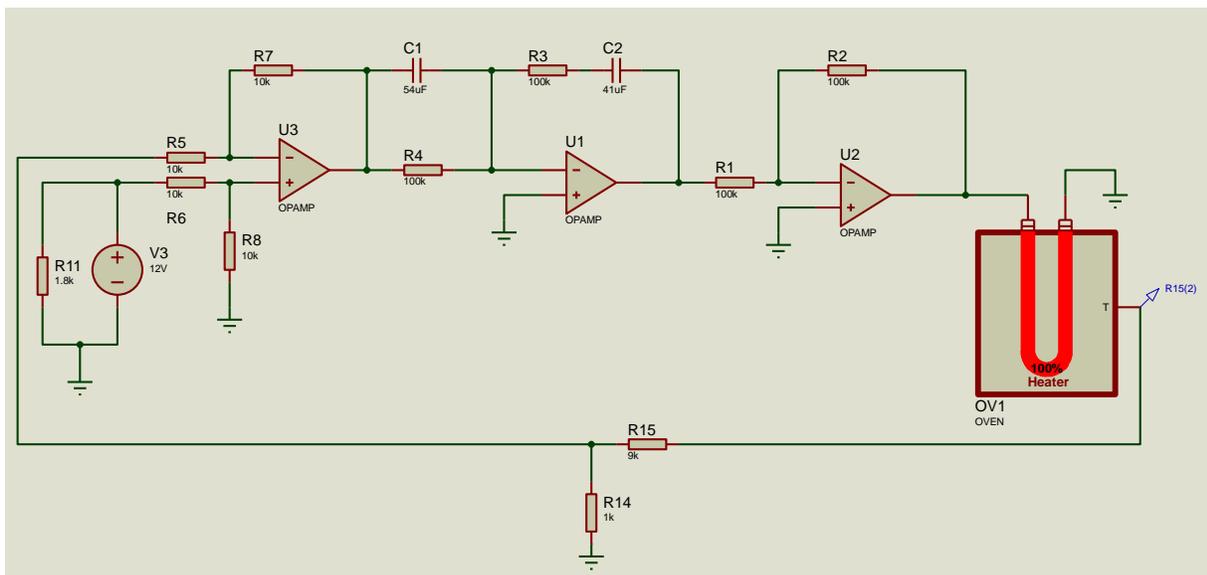
Diagrama de bloques del sistema de control



4.2. Aplicación de herramientas, métodos aplicados y/o estudios realizados

Figura 4.13

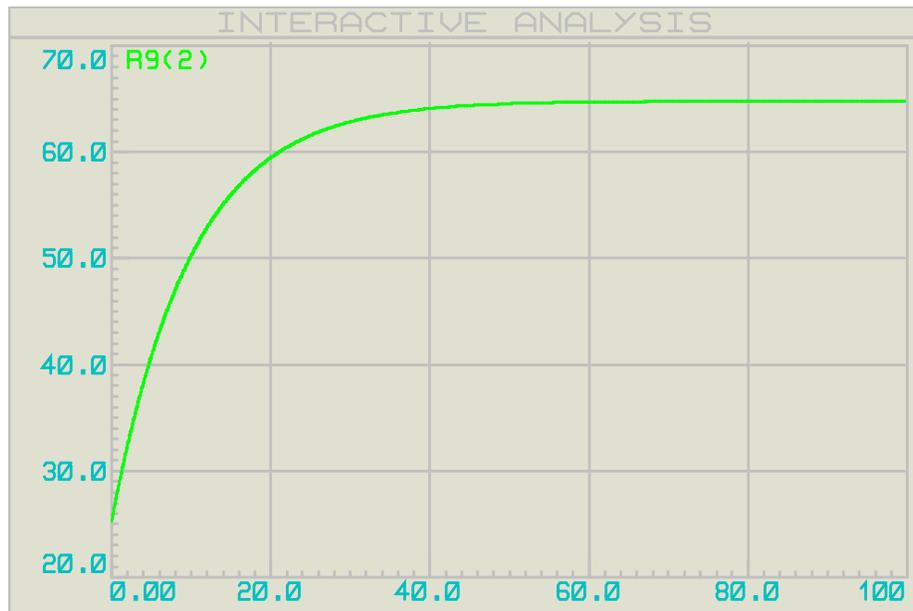
Sistema de control en Proteus.



En la Figura 5.14 se puede observar la respuesta del sistema cuando se ha seleccionado como referencia 65°C, no presenta sobre impulso y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 40 a 60 segundos.

Figura 4.14

Respuesta del sistema de control en Proteus para un Set Point de 65°C.



El restador se obtiene mediante un amplificador operacional que se muestra en la Figura 4.15.

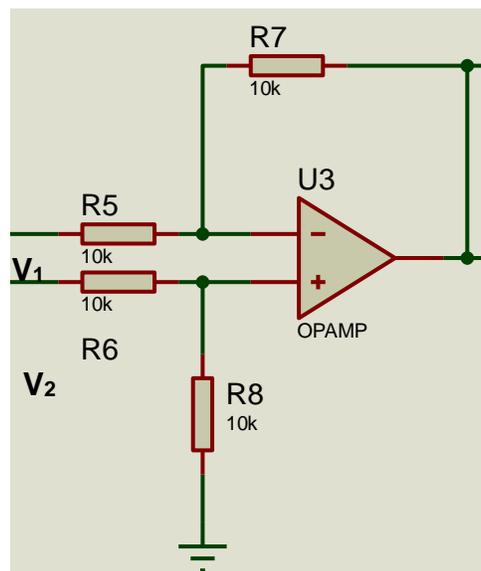
En dónde

si $R_5=R_6=R_7=R_8= 10k$

$$V_{out} = V_2 - V_1 \quad (4.99)$$

Figura 4.15

Circuito restador.

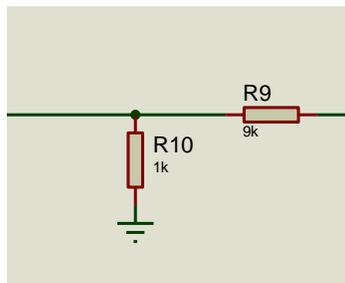


El valor de referencia se obtiene mediante una fuente DC de 12v y una resistencia de 1.8K. Para la temperatura deseada de 65 °C se tiene que el valor de referencia tiene que ser de 6.5V.

Así que se utilizó un divisor de voltaje Figura 4.16, para cambiar la sensibilidad del sensor de 1°C/V a 0.1 °C/V.

Figura 4.16

Divisor de voltaje.



En dónde

$$V_{out} = \frac{R_{10}}{R_{10}+R_9} V_{in} \quad (4.100)$$

Entonces con los valores de las resistencias $R_{10}=1K\Omega$ y $R_9=9K\Omega$

$$V_{out} = \frac{1k\Omega}{1k\Omega+9k\Omega} V_{in} \quad (4.101)$$

$$V_{out} = \frac{1k\Omega}{10k\Omega} V_{in} \quad (4.102)$$

$$V_{out} = 0.1 V_{in} \quad (4.103)$$

El sensor elegido para el sistema de control es el LM35, debido a que tiene un rango de -55°C hasta +150°C y una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

El sensor proporciona 10mV / °C, como se puede observar en la Figura 4.17, en dónde la temperatura es de 30°C y proporciona 300mV o 0.3V a la salida.

Así, al ajustar el voltaje proporcionado por el sensor del horno al del sensor LM35, se obtuvo el siguiente circuito y ahora proporcionará una salida de voltaje de $100\text{mV} / ^\circ\text{C}$ o $0.1\text{V} / ^\circ\text{C}$. De esta manera cuando se establezca la referencia a 65°C , la salida mostrará 6.5V (Figura 4.19 y Figura 4.20).

Figura 4.19

Circuito de control.

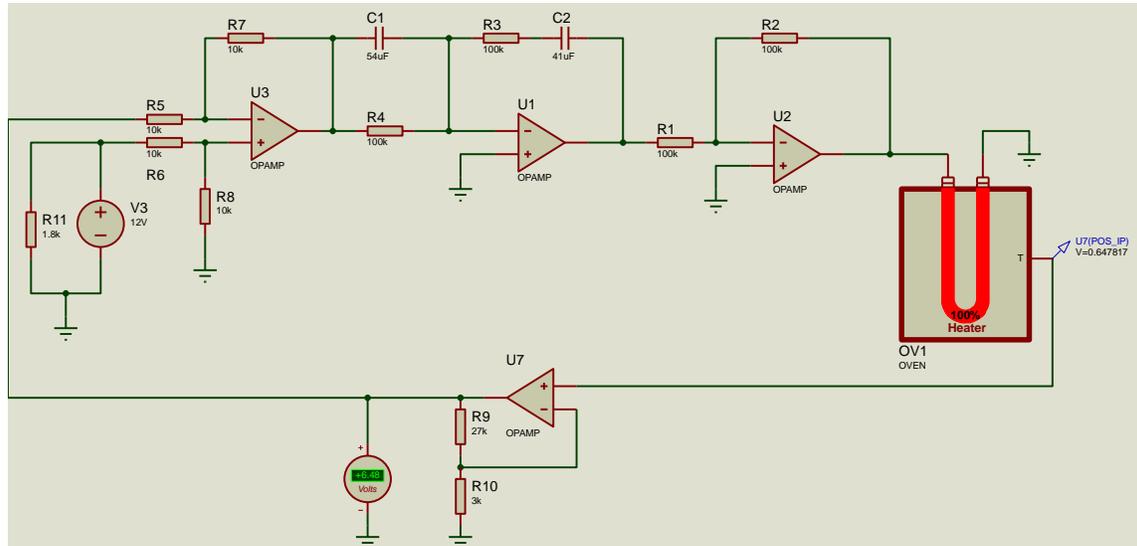
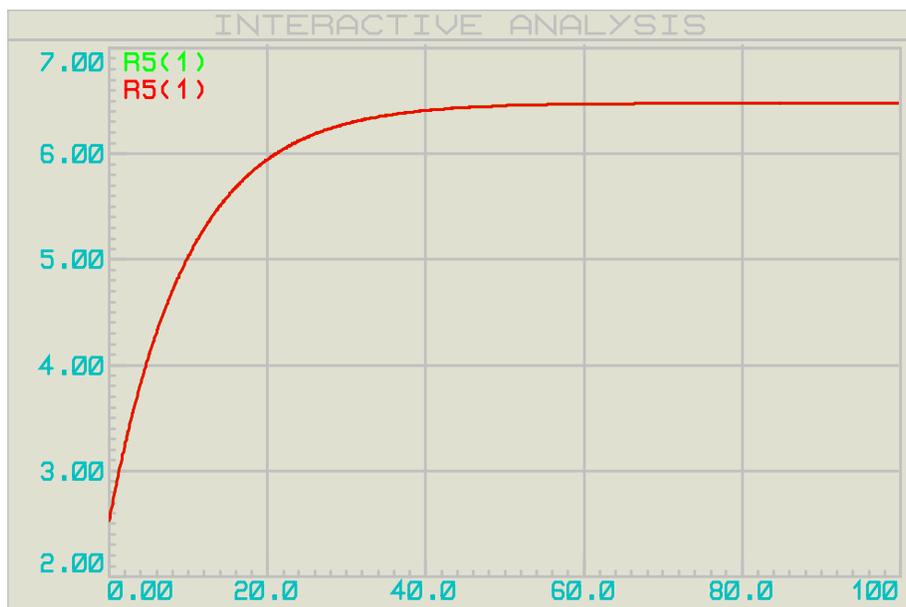


Figura 4.20

Respuesta del sistema de control con $0.1\text{V} / ^\circ\text{C}$.



A continuación se presentan los resultados de la simulación del sistema de control en Simulink.

Método de Smith

$$K_p = 3.24$$

$$T_i = 7.48$$

$$T_d = 1.87$$

$$K_p = 3.24$$

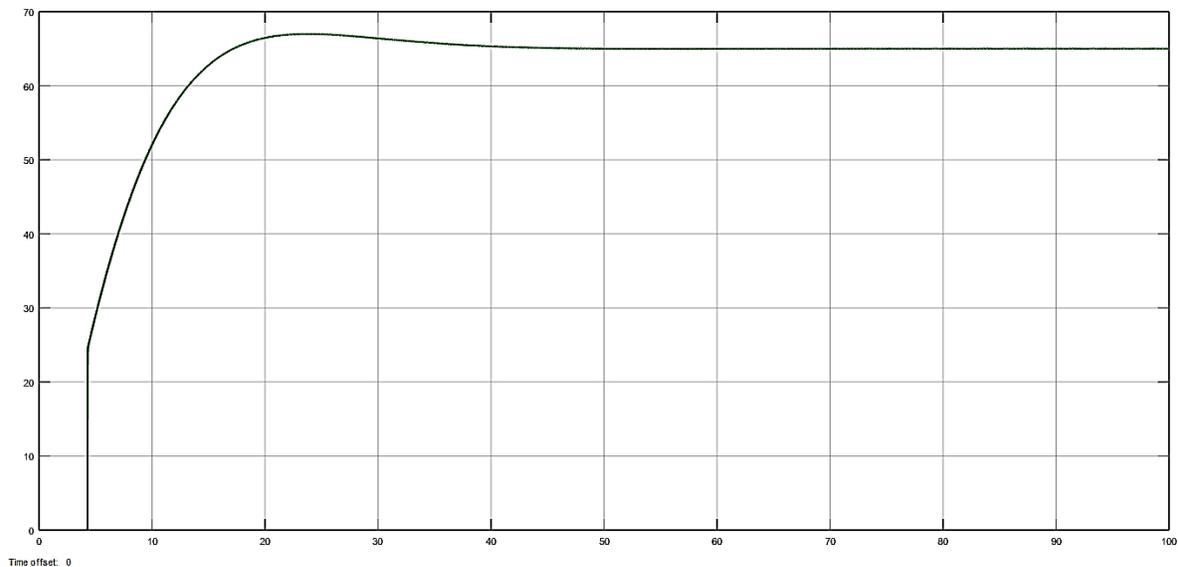
$$K_i = .43$$

$$K_d = 6.06$$

Se obtuvo la respuesta que se presenta en la Figura 4.21.

Figura 4.21

Respuesta del sistema de control con el Método Smith.



Parámetros obtenidos por medio de simulación.

$$K_p = 2.376$$

$$T_i = 8.58$$

$$T_d = 2.145$$

$$K_p = 2.37$$

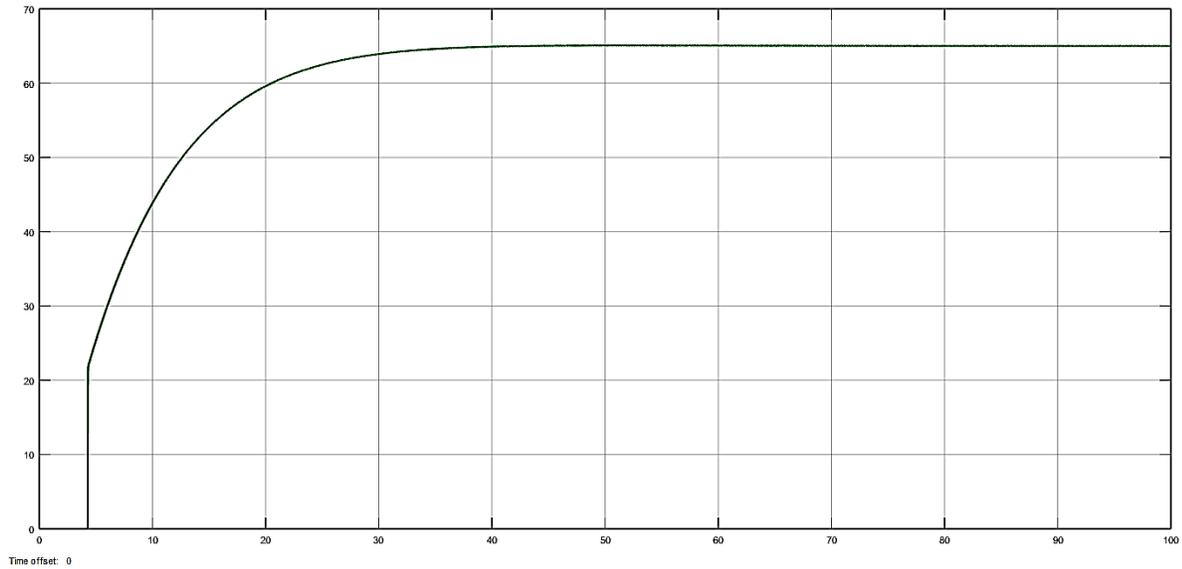
$$K_i = .28$$

$$K_d = 5.097$$

Se obtuvo la respuesta que se presenta en la Figura 4.22

Figura 4.22

Respuesta del sistema de control con los parámetros obtenidos por medio de Matlab.



Se seleccionaron los parámetros que se obtuvieron por medio de Matlab ya que la respuesta no presenta sobreimpulso.

Para validar que el sistema de control estuviera funcionando correctamente, se procedió a perturbarlo con señales cuando la temperatura ambiente es de 5°C (Figura 4.23), 17 °C (Figura 4.24) y 25 °C (Figura 4.25), todas estas siendo temperaturas registradas en la región de San Martín Texmelucan.

Figura 4.23

Respuesta del sistema de control con una perturbación de 5°C.

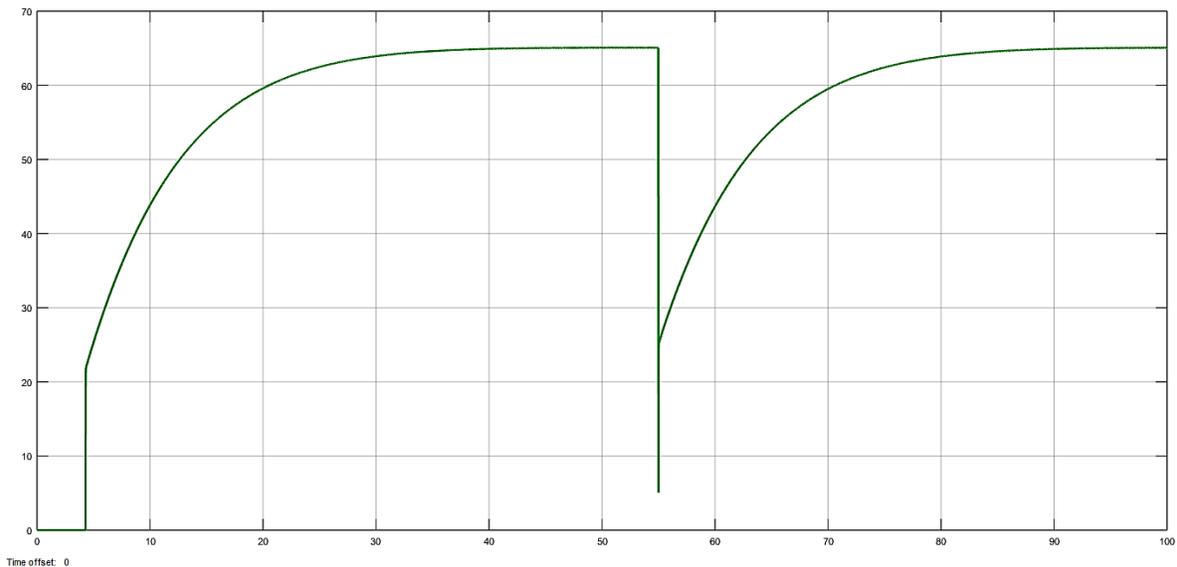


Figura 4.24

Respuesta del sistema de control con una perturbación de 17°C.

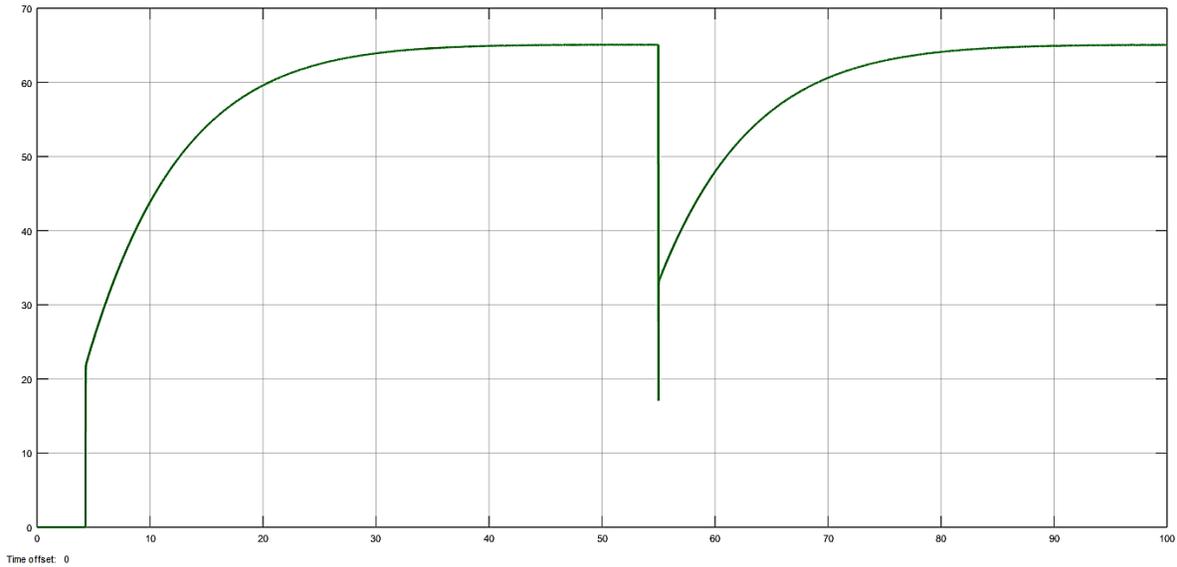
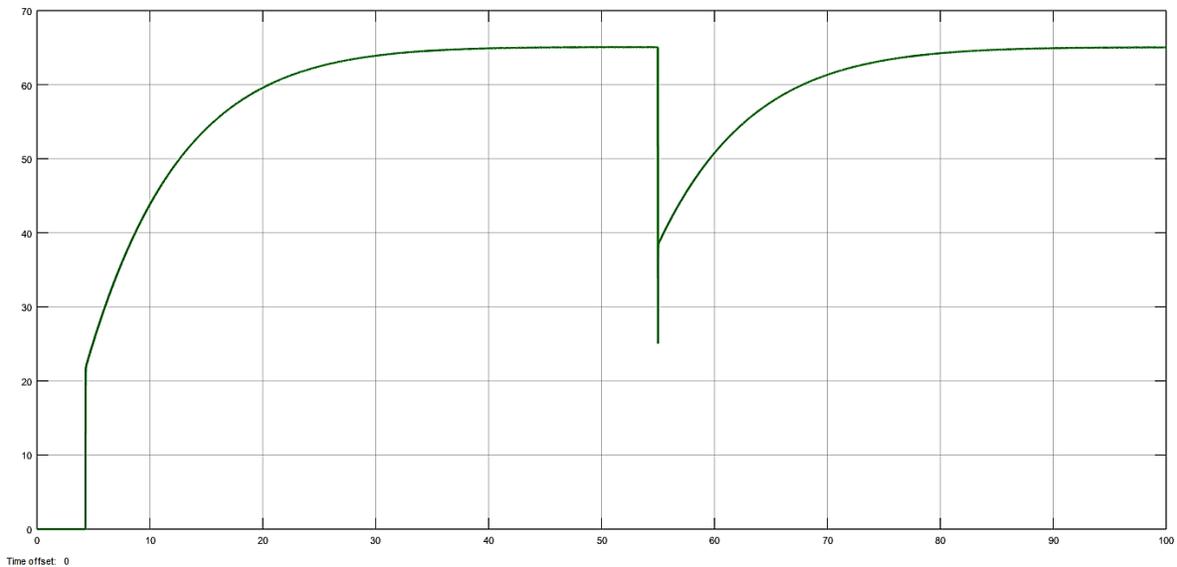


Figura 4.25

Respuesta del sistema de control con una perturbación de 17°C.



Como se puede observar en las Figuras mostradas con anterioridad, se tuvo un resultado más favorable utilizando los parámetros obtenidos por medio de Matlab, no teniendo sobre impulso y obteniendo un tiempo de respuesta de 5s y uno de establecimiento de 40 a 50 segundos, los cuales son muy buenos para permitir que el actuador (resistencia

eléctrica) pueda responder. Además, se considera un sistema estable ya que en la función de transferencia el polo aparece en la parte izquierda del plano complejo. El controlador de temperatura pudo responder a las perturbaciones, disminuyendo la energía en la resistencia permitiendo aprovechar la energía del sol al máximo.

CAPÍTULO V DISCUSIÓN

5.1. Resultados obtenidos & esperados

Después de realizar la simulación del controlador PID, se pudo observar que funcionó como se esperaba, ya que logró mantener la temperatura establecida en el set point, que en este caso fue de 65°C. Además, el sistema fue bastante estable ya que en la función de transferencia el polo apareció en la parte izquierda del plano complejo. Finalmente, también se pudo comprobar que el controlador fue capaz de responder a las perturbaciones, disminuyendo la energía en la resistencia eléctrica permitiendo aprovechar la energía del sol al máximo. Con lo mencionado anteriormente se puede concluir que se cumplieron los objetivos que se plantearon para el diseño del controlador.

5.2. Conclusiones

1. De acuerdo con los resultados de la investigación se estableció una temperatura de operación 50 °C a 70°C como máximo, para evitar que se produzcan efectos adversos en los alimentos.
2. Se determinó el comportamiento de la planta como una función de transferencia de 1er Orden y se utilizó el método de Dos puntos de Smith para obtener los parámetros de la misma, además se corroboraron los resultados realizando la simulación por medio de Matlab.
3. Se sintonizó el controlador PID haciendo uso de las reglas de Ziegler-Nichols, obteniéndose los parámetros K_p , K_i , K_d , T_i y T_d . Además, se obtuvo el valor de los componentes del controlador electrónico.
4. Se simuló el sistema de control de temperatura en Scilab, teniendo un sistema sin sobreimpulso y un tiempo de respuesta de 40 a 50 segundos. Se considera un

sistema estable y capaz de responder a señales de perturbación disminuyendo la energía en la resistencia, permitiendo aprovechar la energía solar al máximo.

5. Se realizó la propuesta del controlador PID analógico y de los componentes del sistema de control. Asimismo, se realizó la simulación en Proteus para comprobar que el valor calculado de los componentes fuera correcto.

5.3.Recomendaciones y aportación

1. Se recomienda el diseño de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) que permita al usuario monitorear el proceso y ajustar el valor de referencia deseado de manera sencilla.
2. Se debe continuar la búsqueda y aplicación de nuevas y mejores tecnologías que permitan controlar sistemas térmicos.
3. Se debería contemplar la idea de la implementación de este sistema de control en condiciones reales para comprobar su funcionamiento.

Referencias bibliográficas

1. Alfaro, V. M. (2011). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado. *Revista Ingeniería de la Universidad de Costa Rica*. 11 (1,2), 11-16. <https://doi.org/10.15517/ring.v11i1-2.605>
2. Ambriz Polo, J.C. (2015). *Diseño e implementación de un controlador PID autoajustable basado en un algoritmo*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/58930>
3. Amestegui, M. M. (2001). Apuntes de control PID.
4. Bañuelos Saucedo, M. A., (1999). *Reporte técnico análisis y diseño de un controlador PID analógico* [Archivo PDF].
<http://www.ccadet.unam.mx/secciones/depar/sub1/elect/semb/documentos/ReporteTecnicoAnalisisyDisenodeunControladorPIDAnalogico1999.pdf>
5. Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control* (2.^a ed.). Alfaomega.
6. Carrillo, A. J. (2011). *Sistemas Automáticos de Control: Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado* (2.^a ed.). UNERMB.
7. Chacón, S. A. (2018). *Deshidratadores solares*. Grupo Zingal.
<https://www.grupozingal.co/wp-content/uploads/2020/10/TEXTO-PARA-DESHIDRATADORES.pdf>
8. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica* (7.^a ed.). Mc Graw Hill.
9. Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (3.^a ed.). McGraw-Hill Education.

10. *Controlador PID* (2010) [Archivo PDF]
<https://www.acomee.com.mx/clasificaciones/CONTROLADOR%20PID.pdf>
11. Delegación SADER Puebla. (06 de Agosto de 2018). *Puebla, 1° lugar en producción de pera a nivel nacional*.
<https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-1-lugar-en-produccion-de-pera-a-nivel-nacional?idiom=es>
12. De Michelis A. & Ohaco E. (2017). *Deshidratación y desecado de frutas, hortaliza y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala*. [Archivo PDF]. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_cartilla_secado.pdf
13. Gascón A., Muravnik N., Suliá P., Ventura L., Bressia C. & D'Innocenzo S. (2006). *Tecnología de elaboración industrial de frutas y hortalizas deshidratadas*. Universidad Nacional del Cuyo. 18-19
14. Giraldo Sepúlveda, E.J. (2014). *Control de temperatura y humedad relativa para un deshidratador solar de frutas*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira]. <http://hdl.handle.net/11059/5129>
15. Kerkhofs, N. L. (2005). Change in colour and antioxidant content of tomato cultivars following forced-air drying. *Plants Foods Human Nutr.*, 117-121.
16. Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (7.ª ed.). Prentice Hall.
17. León Rodríguez, A.J. (2018). *Diseño e implementación de un deshidratador híbrido con paneles fotovoltaicos*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/1892>
18. Obando L. F. (5 de abril de 2018). *Acciones Básicas de Sistemas de Control-PID*.
<https://dademuch.com/2018/04/05/acciones-basicas-de-sistemas-de-control/>
19. Ogata, K. (2002). *Ingeniería de control moderna* (3.ª ed.). Pearson Education.

20. Ramírez Benavides, K. (2017). *Control* [Archivo PDF].
<https://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/Control.pdf>
21. Reyes Sierra, H.I. (2010). *Modelamiento y control digital de temperatura para horno eléctrico*. [Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana].
<http://hdl.handle.net/10554/7044>
22. Rodríguez, B. (2013). *Diseño de un sistema de control para un deshidratador solar híbrido de jitomates, automatizado con técnicas de control clásico*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California].
https://drive.google.com/file/d/0B07Wz0dDs1vFVVNYQWRXdzJMY3c/view?resourcekey=0-Jt2y3a8H5mTL7AzCI1_sbw
23. Rodríguez Suárez, J.S. (2017). *La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México*. PRO MÉXICO (Inversión y Comercio). ISBN: 978-607-97294-8-6
24. Rodríguez Tapia, B., Villanueva Vega E., Partida Castañeda, A., & Avitia Carlos, P. (2017). Revista de Aplicación Científica y Técnica. *Diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar*. Vol. 3 No.10, 37-46.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol3num10/Revista_de_Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica_V3_N10_5.pdf
25. Sánchez, J. (2009). *Diseño y construcción de un controlador PID analógico*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de los Andes].
http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/8/TDE-2012-09-11T22:57:57Z-1592/Publico/sanchezjesdely_parte1.pdf
26. Sayas, F., Quintián H., Jove, E., & Casteleiro, J.L. (2020). Universidade da Coruña. *Diseño de controladores PID*. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497855>

27. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (26 de Septiembre de 2020). *Gobierno de México: La pera que te espera.*
<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-pera-que-te-espera?idiom=es>
28. Torres Capuz, J.L. & Chanoluisa Martínez S. X., (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control en una planta de llenado de tanques a escala usando un transmisor de nivel y algoritmo PID para pruebas en el laboratorio de automatización industrial.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10414>
29. UNAM. (2021). *Deshidratadores Solares – Unidad de Ecotecnologías, UNAM, Campus Morelia.* ECOTEC. <https://ecotec.unam.mx/ecoteca/deshidratadores-solares-2>
30. Valdés, P. (2008). *Frutas y hortalizas.* Manual de deshidratación.
<http://manualdeshidratacion.blogspot.com/2008/09/frutas-y-hortalizas.h>

Anexos Glosario Registro de Proyecto (patentes, derecho de autor, compra venta del proyecto, etc.)

Anexo 1. Datos obtenidos de la simulación de la resistencia eléctrica.

TIME	OV1(T)						
0	24	3.0575	24.1984	5.7075	32.3826	9.5575	44.4789
0.00128	24	3.1075	24.2634	5.8175	32.7776	9.6675	44.7663
0.1	24	3.1575	24.3363	5.9375	33.2066	9.7875	45.0762
0.2025	24	3.2075	24.4165	6.05	33.6067	9.9	45.3635
0.3075	24	3.2575	24.5038	6.1525	33.9692	10.0025	45.6225
0.4175	24	3.3075	24.5976	6.2575	34.3384	10.1075	45.8851
0.5375	24	3.3575	24.6977	6.3675	34.7226	10.2175	46.1573
0.65	24	3.4075	24.8036	6.4875	35.1388	10.3375	46.4508
0.7525	24	3.4575	24.915	6.6	35.5259	10.45	46.7229
0.8575	24	3.5175	25.0556	6.7025	35.8759	10.5525	46.9682
0.9675	24	3.5675	25.1781	6.8075	36.2317	10.6575	47.2169
1.0875	24.0001	3.6175	25.3051	6.9175	36.6014	10.7675	47.4746
1.2	24.0001	3.6675	25.4363	7.0375	37.0011	10.8875	47.7526
1.3025	24.0001	3.7175	25.5716	7.15	37.3724	11	48.0102
1.4075	24.0001	3.7675	25.7106	7.2525	37.7076	11.1025	48.2425
1.5175	24.0001	3.8175	25.8532	7.3575	38.0481	11.2075	48.4779
1.6375	24.0001	3.8675	25.9991	7.4675	38.4015	11.3175	48.7219
1.75	24.0001	3.9175	26.148	7.5875	38.7831	11.4375	48.9851
1.8525	24.0001	3.9675	26.2999	7.7	39.1373	11.55	49.229
1.9575	24.0001	4.0575	26.5798	7.8025	39.4569	11.6525	49.4489
2.0675	24.0001	4.1175	26.7708	7.9075	39.7813	11.7575	49.6718
2.1875	24.0001	4.2075	27.0631	8.0175	40.1178	11.8675	49.9028
2.3	24.0001	4.3075	27.3951	8.1375	40.481	11.9875	50.1519
2.4025	24.0001	4.4075	27.7336	8.25	40.8178	12.1	50.3828
2.5075	24.0001	4.5175	28.1123	8.3525	41.1217	12.2025	50.5909
2.6175	24.0001	4.6175	28.4613	8.4575	41.4299	12.3075	50.8019
2.7375	24.0001	4.7175	28.8141	8.5675	41.7495	12.4175	51.0206
2.751767948	24.0001	4.8375	29.2413	8.6875	42.0944	12.5375	51.2564
2.766798852	24.0008	4.95	29.6447	8.8	42.4142	12.65	51.475
2.8075	24.0077	5.0525	30.0141	8.9025	42.7025	12.7525	51.672
2.8575	24.0262	5.1575	30.3936	9.0075	42.9949	12.8575	51.8717
2.9075	24.055	5.2675	30.7919	9.1175	43.2981	12.9675	52.0787
2.9575	24.0937	5.3875	31.2267	9.2375	43.6252	13.0875	52.3019
3.0075	24.1416	5.5	31.6339	9.35	43.9284	13.2	52.5087
		5.6025	32.0042	9.4525	44.2017	13.3025	52.6952

13.4075	52.8842
13.5175	53.0802
13.6375	53.2915
13.75	53.4873
13.8525	53.6637
13.9575	53.8427
14.0675	54.0281
14.1875	54.2281
14.3	54.4134
14.4025	54.5805
14.5075	54.7498
14.6175	54.9253
14.7375	55.1146
14.85	55.29
14.9525	55.4481
15.0575	55.6084
15.1675	55.7746
15.2875	55.9537
15.4	56.1197
15.5025	56.2694
15.6075	56.4211
15.7175	56.5783
15.8375	56.7479
15.95	56.9051
16.0525	57.0467
16.1575	57.1903
16.2675	57.3391
16.3875	57.4996
16.5	57.6484
16.6025	57.7824
16.7075	57.9183
16.8175	58.0592
16.9375	58.2111
17.05	58.3519
17.1525	58.4788
17.2575	58.6074
17.3675	58.7407
17.4875	58.8845
17.6	59.0177
17.7025	59.1378
17.8075	59.2596

17.9175	59.3858
18.0375	59.5219
18.15	59.648
18.2525	59.7617
18.3575	59.8769
18.4675	59.9963
18.5875	60.1251
18.7	60.2445
18.8025	60.3521
18.9075	60.4612
19.0175	60.5742
19.1375	60.6961
19.25	60.8091
19.3525	60.9109
19.4575	61.0141
19.5675	61.1211
19.6875	61.2365
19.8	61.3435
19.9025	61.4398
20.0075	61.5376
20.1175	61.6388
20.2375	61.748
20.35	61.8492
20.4525	61.9405
20.5575	62.0329
20.6675	62.1288
20.7875	62.2322
20.9	62.328
21.0025	62.4143
21.1075	62.5018
21.2175	62.5926
21.3375	62.6904
21.45	62.7811
21.5525	62.8628
21.6575	62.9456
21.7675	63.0315
21.8875	63.1241
22	63.2099
22.1025	63.2872
22.2075	63.3657
22.3175	63.4469

22.4375	63.5346
22.55	63.6158
22.6525	63.689
22.7575	63.7632
22.8675	63.8402
22.9875	63.9231
23.1	64
23.2025	64.0693
23.3075	64.1395
23.4175	64.2123
23.5375	64.2908
23.65	64.3636
23.7525	64.4292
23.8575	64.4957
23.9675	64.5646
24.0875	64.6389
24.2	64.7078
24.3025	64.7698
24.4075	64.8328
24.5175	64.898
24.6375	64.9683
24.75	65.0335
24.8525	65.0923
24.9575	65.1518
25.0675	65.2136
25.1875	65.2801
25.3	65.3418
25.4025	65.3974
25.5075	65.4538
25.6175	65.5122
25.7375	65.5752
25.85	65.6336
25.9525	65.6863
26.0575	65.7396
26.1675	65.7949
26.2875	65.8546
26.4	65.9098
26.5025	65.9596
26.6075	66.0101
26.7175	66.0625
26.8375	66.1189

26.95	66.1712
27.0525	66.2184
27.1575	66.2662
27.2675	66.3157
27.3875	66.3692
27.5	66.4187
27.6025	66.4633
27.7075	66.5085
27.8175	66.5554
27.9375	66.606
28.05	66.6529
28.1525	66.6951
28.2575	66.7379
28.3675	66.7823
28.4875	66.8302
28.6	66.8745
28.7025	66.9145
28.8075	66.955
28.9175	66.997
29.0375	67.0423
29.15	67.0843
29.2525	67.1221
29.3575	67.1605
29.4675	67.2003
29.5875	67.2431
29.7	67.2829
29.8025	67.3187
29.9075	67.355
30.0175	67.3926
30.1375	67.4332
30.25	67.4708
30.3525	67.5047
30.4575	67.5391
30.5675	67.5747
30.6875	67.6131
30.8	67.6487
30.9025	67.6808
31.0075	67.7133
31.1175	67.747
31.2375	67.7834
31.35	67.8171

31.4525	67.8474
31.5575	67.8782
31.6675	67.9101
31.7875	67.9445
31.9	67.9764
32.0025	68.0052
32.1075	68.0343
32.2175	68.0645
32.3375	68.0971
32.45	68.1272
32.5525	68.1544
32.6575	68.182
32.7675	68.2106
32.8875	68.2414
33	68.27
33.1025	68.2957
33.2075	68.3218
33.3175	68.3489
33.4375	68.3781
33.55	68.4051
33.6525	68.4295
33.7575	68.4542
33.8675	68.4798
33.9875	68.5074
34.1	68.533
34.2025	68.5561
34.3075	68.5794
34.4175	68.6037
34.5375	68.6298
34.65	68.654
34.7525	68.6759
34.8575	68.698
34.9675	68.7209
35.0875	68.7457
35.2	68.7686
35.3025	68.7893
35.4075	68.8102
35.5175	68.8319
35.6375	68.8553
35.75	68.877
35.8525	68.8966

35.9575	68.9164
36.0675	68.937
36.1875	68.9591
36.3	68.9797
36.4025	68.9982
36.5075	69.0169
36.6175	69.0364
36.7375	69.0574
36.85	69.0768
36.9525	69.0943
37.0575	69.1121
37.1675	69.1305
37.2875	69.1503
37.4	69.1687
37.5025	69.1853
37.6075	69.2021
37.7175	69.2196
37.8375	69.2383
37.95	69.2558
38.0525	69.2715
38.1575	69.2874
38.2675	69.3039
38.3875	69.3216
38.5	69.3381
38.6025	69.353
38.7075	69.368
38.8175	69.3836
38.9375	69.4005
39.05	69.4161
39.1525	69.4301
39.2575	69.4444
39.3675	69.4592
39.4875	69.4751
39.6	69.4899
39.7025	69.5032
39.8075	69.5167
39.9175	69.5306
40.0375	69.5457
40.15	69.5597
40.2525	69.5723
40.3575	69.5851

40.4675	69.5983
40.5875	69.6126
40.7	69.6258
40.8025	69.6377
40.9075	69.6498
41.0175	69.6623
41.1375	69.6758
41.25	69.6884
41.3525	69.6996
41.4575	69.7111
41.5675	69.7229
41.6875	69.7357
41.8	69.7476
41.9025	69.7582
42.0075	69.7691
42.1175	69.7803
42.2375	69.7924
42.35	69.8036
42.4525	69.8137
42.5575	69.824
42.6675	69.8346
42.7875	69.846
42.9	69.8567
43.0025	69.8662
43.1075	69.8759
43.2175	69.886
43.3375	69.8968
43.45	69.9069
43.5525	69.9159
43.6575	69.9251
43.7675	69.9346
43.8875	69.9449
44	69.9544
44.1025	69.963
44.2075	69.9716
44.3175	69.9806
44.4375	69.9904
44.55	69.9994
44.6525	70.0075
44.7575	70.0157
44.8675	70.0242

44.9875	70.0334
45.1	70.0419
45.2025	70.0496
45.3075	70.0574
45.4175	70.0655
45.5375	70.0742
45.65	70.0822
45.7525	70.0895
45.8575	70.0969
45.9675	70.1045
46.0875	70.1127
46.2	70.1204
46.3025	70.1272
46.4075	70.1342
46.5175	70.1414
46.6375	70.1492
46.75	70.1565
46.8525	70.163
46.9575	70.1696
47.0675	70.1764
47.1875	70.1838
47.3	70.1906
47.4025	70.1968
47.5075	70.203
47.6175	70.2095
47.7375	70.2165
47.85	70.2229
47.9525	70.2288
48.0575	70.2347
48.1675	70.2408
48.2875	70.2474
48.4	70.2536
48.5025	70.2591
48.6075	70.2647
48.7175	70.2705
48.8375	70.2767
48.95	70.2825
49.0525	70.2877
49.1575	70.293
49.2675	70.2985
49.3875	70.3045

49.5	70.3099
49.6025	70.3149
49.7075	70.3199
49.8175	70.3251
49.9375	70.3307
50.05	70.3359
50.1525	70.3406
50.2575	70.3453
50.3675	70.3502
50.4875	70.3555
50.6	70.3604
50.7025	70.3649
50.8075	70.3694
50.9175	70.374
51.0375	70.379
51.15	70.3837
51.2525	70.3879
51.3575	70.3921
51.4675	70.3965
51.5875	70.4013
51.7	70.4057
51.8025	70.4097
51.9075	70.4137
52.0175	70.4179
52.1375	70.4224
52.25	70.4265
52.3525	70.4303
52.4575	70.4341
52.5675	70.438
52.6875	70.4423
52.8	70.4462
52.9025	70.4498
53.0075	70.4534
53.1175	70.4571
53.2375	70.4612
53.35	70.4649
53.4525	70.4683
53.5575	70.4717
53.6675	70.4752
53.7875	70.479
53.9	70.4825

54.0025	70.4857
54.1075	70.489
54.2175	70.4923
54.3375	70.4959
54.45	70.4993
54.5525	70.5023
54.6575	70.5053
54.7675	70.5085
54.8875	70.5119
55	70.5151
55.1025	70.5179
55.2075	70.5208
55.3175	70.5238
55.4375	70.5271
55.55	70.5301
55.6525	70.5328
55.7575	70.5355
55.8675	70.5383
55.9875	70.5414
56.1	70.5442
56.2025	70.5468
56.3075	70.5494
56.4175	70.5521
56.5375	70.5549
56.65	70.5576
56.7525	70.5601
56.8575	70.5625
56.9675	70.565
57.0875	70.5678
57.2	70.5703
57.3025	70.5726
57.4075	70.5749
57.5175	70.5773
57.6375	70.5799
57.75	70.5823
57.8525	70.5845
57.9575	70.5867
58.0675	70.589
58.1875	70.5914
58.3	70.5937
58.4025	70.5958

58.5075	70.5978
58.6175	70.6
58.7375	70.6023
58.85	70.6045
58.9525	70.6064
59.0575	70.6084
59.1675	70.6104
59.2875	70.6126
59.4	70.6147
59.5025	70.6165
59.6075	70.6184
59.7175	70.6203
59.8375	70.6224
59.95	70.6243
60.0525	70.626
60.1575	70.6278
60.2675	70.6296
60.3875	70.6316
60.5	70.6334
60.6025	70.6351
60.7075	70.6368
60.8175	70.6385
60.9375	70.6403
61.05	70.6421
61.1525	70.6436
61.2575	70.6452
61.3675	70.6468
61.4875	70.6486
61.6	70.6502
61.7025	70.6517
61.8075	70.6532
61.9175	70.6548
62.0375	70.6564
62.15	70.658
62.2525	70.6594
62.3575	70.6608
62.4675	70.6623
62.5875	70.6638
62.7	70.6653
62.8025	70.6666
62.9075	70.668

63.0175	70.6694
63.1375	70.6709
63.25	70.6722
63.3525	70.6735
63.4575	70.6748
63.5675	70.6761
63.6875	70.6775
63.8	70.6788
63.9025	70.68
64.0075	70.6812
64.1175	70.6824
64.2375	70.6838
64.35	70.685
64.4525	70.6861
64.5575	70.6873
64.6675	70.6884
64.7875	70.6897
64.9	70.6909
65.0025	70.692
65.1075	70.693
65.2175	70.6941
65.3375	70.6953
65.45	70.6965
65.5525	70.6975
65.6575	70.6985
65.7675	70.6995
65.8875	70.7007
66	70.7017
66.1025	70.7027
66.2075	70.7036
66.3175	70.7046
66.4375	70.7057
66.55	70.7067
66.6525	70.7076
66.7575	70.7085
66.8675	70.7095
66.9875	70.7105
67.1	70.7114
67.2025	70.7123
67.3075	70.7131
67.4175	70.714

67.5375	70.715
67.65	70.7159
67.7525	70.7167
67.8575	70.7175
67.9675	70.7184
68.0875	70.7193
68.2	70.7201
68.3025	70.7209
68.4075	70.7216
68.5175	70.7224
68.6375	70.7233
68.75	70.7241
68.8525	70.7248
68.9575	70.7256
69.0675	70.7263
69.1875	70.7271
69.3	70.7279
69.4025	70.7286
69.5075	70.7293
69.6175	70.73
69.7375	70.7308
69.85	70.7315
69.9525	70.7321
70.0575	70.7328
70.1675	70.7335
70.2875	70.7342
70.4	70.7349
70.5025	70.7355
70.6075	70.7361
70.7175	70.7367
70.8375	70.7374
70.95	70.7381
71.0525	70.7387
71.1575	70.7392
71.2675	70.7399
71.3875	70.7405
71.5	70.7411
71.6025	70.7417
71.7075	70.7422
71.8175	70.7428
71.9375	70.7434

72.05	70.744
72.1525	70.7445
72.2575	70.745
72.3675	70.7456
72.4875	70.7462
72.6	70.7467
72.7025	70.7472
72.8075	70.7477
72.9175	70.7482
73.0375	70.7488
73.15	70.7493
73.2525	70.7498
73.3575	70.7502
73.4675	70.7507
73.5875	70.7512
73.7	70.7517
73.8025	70.7522
73.9075	70.7526
74.0175	70.7531
74.1375	70.7536
74.25	70.754
74.3525	70.7545
74.4575	70.7549
74.5675	70.7553
74.6875	70.7558
74.8	70.7562
74.9025	70.7566
75.0075	70.757
75.1175	70.7574
75.2375	70.7579
75.35	70.7583
75.4525	70.7587
75.5575	70.759
75.6675	70.7594
75.7875	70.7599
75.9	70.7602
76.0025	70.7606
76.1075	70.761
76.2175	70.7613
76.3375	70.7617
76.45	70.7621

76.5525	70.7624
76.6575	70.7628
76.7675	70.7631
76.8875	70.7635
77	70.7639
77.1025	70.7642
77.2075	70.7645
77.3175	70.7648
77.4375	70.7652
77.55	70.7655
77.6525	70.7658
77.7575	70.7661
77.8675	70.7664
77.9875	70.7668
78.1	70.7671
78.2025	70.7674
78.3075	70.7677
78.4175	70.7679
78.5375	70.7683
78.65	70.7686
78.7525	70.7688
78.8575	70.7691
78.9675	70.7694
79.0875	70.7697
79.2	70.77
79.3025	70.7702
79.4075	70.7705
79.5175	70.7708
79.6375	70.771
79.75	70.7713
79.8525	70.7715
79.9575	70.7718
80.0675	70.772
80.1875	70.7723
80.3	70.7726
80.4025	70.7728
80.5075	70.773
80.6175	70.7733
80.7375	70.7735
80.85	70.7738
80.9525	70.774

81.0575	70.7742
81.1675	70.7744
81.2875	70.7747
81.4	70.7749
81.5025	70.7751
81.6075	70.7753
81.7175	70.7755
81.8375	70.7757
81.95	70.776
82.0525	70.7761
82.1575	70.7763
82.2675	70.7765
82.3875	70.7768
82.5	70.777
82.6025	70.7771
82.7075	70.7773
82.8175	70.7775
82.9375	70.7777
83.05	70.7779
83.1525	70.7781
83.2575	70.7783
83.3675	70.7785
83.4875	70.7786
83.6	70.7788
83.7025	70.779
83.8075	70.7792
83.9175	70.7793
84.0375	70.7795
84.15	70.7797
84.2525	70.7798
84.3575	70.78
84.4675	70.7802
84.5875	70.7803
84.7	70.7805
84.8025	70.7806
84.9075	70.7808
85.0175	70.7809
85.1375	70.7811
85.25	70.7813
85.3525	70.7814
85.4575	70.7815

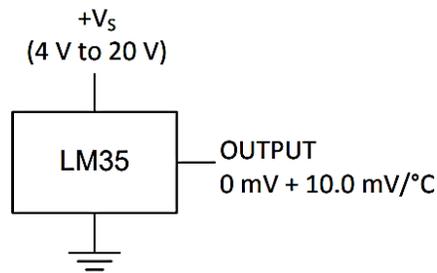
85.5675	70.7817
85.6875	70.7818
85.8	70.782
85.9025	70.7821
86.0075	70.7823
86.1175	70.7824
86.2375	70.7825
86.35	70.7827
86.4525	70.7828
86.5575	70.7829
86.6675	70.7831
86.7875	70.7832
86.9	70.7833
87.0025	70.7835
87.1075	70.7836
87.2175	70.7837
87.3375	70.7838
87.45	70.7839
87.5525	70.7841
87.6575	70.7842
87.7675	70.7843
87.8875	70.7844
88	70.7845
88.1025	70.7846
88.2075	70.7847
88.3175	70.7849
88.4375	70.785
88.55	70.7851
88.6525	70.7852
88.7575	70.7853
88.8675	70.7854
88.9875	70.7855
89.1	70.7856
89.2025	70.7857

89.3075	70.7858
89.4175	70.7859
89.5375	70.786
89.65	70.7861
89.7525	70.7862
89.8575	70.7863
89.9675	70.7864
90.0875	70.7865
90.2	70.7866
90.3025	70.7867
90.4075	70.7867
90.5175	70.7868
90.6375	70.7869
90.75	70.787
90.8525	70.7871
90.9575	70.7872
91.0675	70.7873
91.1875	70.7873
91.3	70.7874
91.4025	70.7875
91.5075	70.7876
91.6175	70.7877
91.7375	70.7878
91.85	70.7878
91.9525	70.7879
92.0575	70.788
92.1675	70.788
92.2875	70.7881
92.4	70.7882
92.5025	70.7883
92.6075	70.7883
92.7175	70.7884
92.8375	70.7885
92.95	70.7886

93.0525	70.7886
93.1575	70.7887
93.2675	70.7888
93.3875	70.7888
93.5	70.7889
93.6025	70.789
93.7075	70.789
93.8175	70.7891
93.9375	70.7892
94.05	70.7892
94.1525	70.7893
94.2575	70.7893
94.3675	70.7894
94.4875	70.7895
94.6	70.7895
94.7025	70.7896
94.8075	70.7896
94.9175	70.7897
95.0375	70.7897
95.15	70.7898
95.2525	70.7899
95.3575	70.7899
95.4675	70.79
95.5875	70.79
95.7	70.7901
95.8025	70.7901
95.9075	70.7902
96.0175	70.7902
96.1375	70.7903
96.25	70.7903
96.3525	70.7904
96.4575	70.7904
96.5675	70.7905
96.6875	70.7905

96.8	70.7906
96.9025	70.7906
97.0075	70.7907
97.1175	70.7907
97.2375	70.7908
97.35	70.7908
97.4525	70.7908
97.5575	70.7909
97.6675	70.7909
97.7875	70.791
97.9	70.791
98.0025	70.7911
98.1075	70.7911
98.2175	70.7911
98.3375	70.7912
98.45	70.7912
98.5525	70.7913
98.6575	70.7913
98.7675	70.7913
98.8875	70.7914
99	70.7914
99.1025	70.7915
99.2075	70.7915
99.3175	70.7915
99.4375	70.7916
99.55	70.7916
99.6525	70.7916
99.7575	70.7917
99.8675	70.7917
99.9875	70.7917
100	70.7917

Anexo 2. Especificaciones del sensor de temperatura analógico LM35



El LM35 es un sensor de temperatura de buenas prestaciones a un bajo precio. Posee un rango de trabajo desde -55°C hasta 150°C . Su salida es de tipo analógica y lineal con una pendiente de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. El sensor es calibrado de fábrica a una precisión de 0.5°C .

Especificaciones técnicas

- Voltaje de Operación: 4V – 30V (5V recomendado)
- Rango de Trabajo: -55°C hasta $+150^{\circ}\text{C}$
- Precisión en el rango de -10°C hasta $+85^{\circ}\text{C}$: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Pendiente: $10\text{mV} / ^{\circ}\text{C}$
- Bajo consumo energético: 60uA
- No necesita componentes adicionales
- Pines: +VCC, V salida, GND
- Baja impedancia de salida

