

Diseño e implementación de un controlador PID de temperatura para un sistema
dinámico térmico de un silo secador de café de dos pisos

Sergio Andrés Gómez Gutiérrez e Iván Darío Santos Calderón

Trabajo de grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Ph.D., MSc. Carlos Borrás Pinilla

Codirector

MSc. Helio Sneyder Esteban Villegas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a Dios y a nuestra familia. Sin su apoyo inquebrantable, esta etapa en nuestras vidas no habría sido posible culminarla con éxito. Representa un hito significativo que marcará un antes y un después tanto en nuestra carrera profesional como en nuestra integridad personal.

A lo largo de estos años de arduo trabajo, hemos experimentado un aprendizaje constante y enriquecedor. Este logro no solo es el resultado de nuestro esfuerzo, dedicación y perseverancia, sino también del amor, comprensión y respaldo incondicional que hemos recibido de nuestras familias.

Su apoyo moral, emocional y financiero nos ha impulsado a superar obstáculos y desafíos, y nos ha brindado la fortaleza necesaria para alcanzar nuestros objetivos académicos. Estamos profundamente agradecidos por su presencia constante a nuestro lado durante este viaje. Por otro lado, queremos agradecer a nuestros profesores que a lo largo de la carrera nos formaron en lo técnico y en la integridad personal.

Además, extendemos nuestro agradecimiento a nuestros directores de proyecto, quienes desempeñaron un papel esencial en nuestra trayectoria académica. Su orientación experta, su apoyo constante y su dedicación a nuestro éxito fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este proyecto. Su guía nos permitió sortear obstáculos y alcanzar nuestros objetivos de manera efectiva.

Con gratitud eterna,

Sergio Gómez Gutiérrez e Iván Darío Santos Calderón

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo general	20
1.2 Objetivos específicos	20
2. Marco teórico	21
2.1 Antecedentes	21
2.1.1 Internacional.....	21
2.1.2 Nacional	22
2.1.3 Regional	23
2.2 Referentes teóricos	24
2.2.1 Silo secador estático.....	24
2.2.2 Función de transferencia	26
2.2.3 Control PID	26
2.2.4. Modelado caja negra	27
2.2.4 Método de estimación caja negra Van der Grinten.....	28
2.2.5 Método de Estimación caja negra Smith.....	30
2.2.6 Método de estimación Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin).....	30
2.2.4 Herramientas de control lineal	34
3. Metodología	38

3.1 Tipo de investigación	38
3.2 Técnicas y procedimientos aplicados para resolver los objetivos.....	39
3.2.1 Modelar matemáticamente el proceso de variación de temperatura de la planta.....	39
3.2.2 Sintonizar un controlador PID por medio de herramientas de diseño de control lineal	40
3.2.3 Implementar el controlador PID continuo al silo secador de dos pisos	40
3.2.4 Validar el funcionamiento del controlador PID	41
3.3 Método en V.....	41
3.3.1 Definición de requerimientos	41
3.3.2 Diseño funcional del sistema	42
4. Selección de componentes electrónicos	45
4.1 Sensores de temperatura.....	45
4.1.1 Sensor PT100:	46
4.1.2 Acondicionamiento de señales	47
4.2 Encoder	49
4.3 Fuente de alimentación	50
4.5 Control del motorreductor monofásico	52
4.6 Potenciómetro digital 10KΩ DIP-8.....	58
4.7 Selección del PLC	60
4.7.1 Alternativa 1: Sistema con control industrial PLC	60

4.7.2 Alternativa 2: Controllino MINI Arduino	61
4.7.3 Alternativa 3: SPARTAN PLC Arduino	62
4.7.4 Alternativa 4: Sistema embebido que cumpla con los requerimientos del sistema .	63
4.7.5 Comparación de las alternativas entre controladores	64
5. Construcción e implementación caja de control	67
5.1 Adaptación de la caja de control	67
5.2 Señales visuales y alarma de caja de control.....	68
5.3 Diseño PCB.....	70
5.4 Ensamble de componentes	71
5.5 Montaje en planta.....	75
5.5.1 Instalación sensor Pt100.....	75
5.5.2 Instalación encoder	77
5.5.3 Instalación caja de control.....	78
6. Modelado matemático y simulación del proceso de variación de temperatura por medio de la función de transferencia	80
6.1 Ecuaciones de gobierno del sistema.....	80
6.1.1 Modelado de la cámara de combustión.....	80
6.2 Modelo de la ecuación de transferencia por método caja negra	87
6.2.1 Método Eye Ball-Método Van Der Grinten.....	89
6.2.2 Metodo Eye Ball-Metodo Smith	92

6.2.3 Método Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin)	94
7. Sintonización y validación	99
7.1 Sintonización.....	99
7.2 Sintonización ecuación de transferencia Método Eye Ball-Método Smith	99
7.3 Sintonización ecuación de transferencia Método Eye Ball-Método Van Der Grinten	
	101
7.4 Sintonización ecuación de transferencia Método Trust-Region Reflective Newton	
(Isqnonlin)	103
7.5 Comparaciones constantes obtenida en la sintonización para cada ecuación de	
transferencia	105
7.6 Validación del controlador	108
8. Conclusiones	111
9. Presupuesto.....	113
Referencias	114
Apéndices	117

Lista de figuras

Figura 1. Esquema Funcionamiento secador de dos pisos con inversión de flujo.....	24
Figura 2. Componentes principales de un silo secador de dos pisos con inversión de flujo.	25
Figura 3. Esquema del intercambiador de calor para el secado de café.....	26
Figura 4. Diagrama de bloques control PID	27
Figura 5. Comparación modelo vs sistema.	28
Figura 6. Método Caja Negra.....	28
Figura 7. Método Eye Ball-Smith.	29
Figura 8. Método Smith	30
Figura 9. Comparación sistema vs modelo.	31
Figura 10. Control PID de una planta.	35
Figura 11. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta	36
Figura 12. Método de diseño en V.....	39
Figura 13. Componentes de un lazo de control.....	42
Figura 14. Control de procesos automáticos.....	43
Figura 15. Sonda sensor PT100.	47
Figura 16. Conversor RTD PT100 a 4~20mA (0°C ~ 150°C) Riel DIN.....	48
Figura 17. Módulo Convertidor De Señal Corriente A Voltaje 4-20ma A 0-10V.....	49
Figura 18. Encoder.....	50
Figura 19. Fuente 24VDC 10A 240W RIEL DIN INP 85/264VAC MORNSUN.	51
Figura 20. Caja de control.....	52
Figura 21. Módulo dimmer digital 1ch 1kw para arduino triac bta312 - sutagao.....	53

Figura 22. Circuito Dimmer-Motorreductor.	54
Figura 23. Controlador de velocidad para motor 110VAC de 60W.	55
Figura 24. Onda generada por controlador de velocidad.	57
Figura 25. Comunicación SPI tipo encadenado.	58
Figura 26. Comunicación SPI tipo paralelo	58
Figura 27. potenciómetro digital.	59
Figura 28. Esquema conexión potenciómetro.	60
Figura 29. PLC Siemens S7-1200 CPU1212C.	61
Figura 30. Controllino MINI Arduino.	62
Figura 31. SPARTAN PLC Arduino.	63
Figura 32. Arduino ruggeduino.	64
Figura 33. Riel Din.	67
Figura 34. Bornera riel din.	67
Figura 35. Pilotos led.	68
Figura 36. Sirena.	69
Figura 37. Pulsador de seguridad tipo hongo.	69
Figura 38. Selector de 3 posiciones.	70
Figura 39. Diagrama potenciómetros.	70
Figura 40. PCB.	71
Figura 41. Esquema caja de control.	72
Figura 42. Conexión conversor corriente-voltaje.	73
Figura 43. Conexión PCB, Controllino.	74
Figura 44. Conexión caja de control	74

Figura 45. Circuito relés controllino	75
Figura 46. Instalación Racor NPT ½”	76
Figura 47. Instalación Sensor Pt 100.	76
Figura 48. Instalación Enconder.	77
Figura 49. Piñón Encoder.....	77
Figura 50. Caja de control Instalada.	78
Figura 51. Conectores Impermeables.....	79
Figura 52. Caracterización tipos de biomasa.	87
Figura 53. Caja Negra.	88
Figura 54. Toma de datos para el modelado de la función de transferencia.	88
Figura 55. Escalón vs tiempo y Grafica temperatura vs tiempo.	89
Figura 56. Gráfica método Van Der Grinten	90
Figura 57. Diagrama de Bloques método Van Der Grinten.....	91
Figura 58. Simulación método de Van Der Grinten.	92
Figura 59. Gráfica método Smith.....	93
Figura 60. Diagrama de bloques método Smith.....	94
Figura 61. Simulación modelo método de Smith.....	94
Figura 62. Método Isqnonlin.....	94
Figura 63. Diagrama de bloques para graficar función de transferencia.	97
Figura 64. Gráfica función de transferencia en respuesta de escalón.	97
Figura 65. Gráfica comparación funciones de transferencia.....	98
Figura 66. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Smith.	100

Figura 67. Sintonización función de transferencia método Smith. 100

Figura 68. Función de transferencia método Smith con perturbación. 101

Figura 69. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Van Der Grinten. 102

Figura 70. Sintonización función de transferencia método Van Der Grinten. 102

Figura 71. Sintonización función de transferencia método Van Der Grinten con perturbación. 103

Figura 72. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Isqnonlin. 104

Figura 73. Sintonización función de transferencia método Isqnonlin. 104

Figura 74. Sintonización función de transferencia método Isqnonlin con perturbación. 105

Figura 75. Comparación de la sintonización de las funciones de transferencia. 107

Figura 76. Gráfica control de temperatura real. 108

Figura 77. Gráfica control de temperatura simulada. 109

Figura 78. Gráfica control de temperatura con dos sets point. 109

Lista de tablas

Tabla 1. Requerimientos del sistema	41
Tabla 2. Comparación Sensores de temperatura.....	45
Tabla 3. Especificaciones sensor PT100.....	47
Tabla 4. Especificaciones conversor RTD PT100 a 4~20mA (0°C ~ 150°C) Riel DIN...	48
Tabla 5. Especificaciones Encoder E50S8-600-3-T-24.....	50
Tabla 6. Especificaciones Fuente 24VDC 10A 240W RIEL DIN INP 85/264VAC MORNSUN.....	51
Tabla 7. Comparación entre onda Triac vs generada por el dimmer.	54
Tabla 8. Especificaciones controlador de velocidad para motor 110V AC de 60W.....	56
Tabla 9. Especificaciones Potenciómetro digital 10KΩ DIP-8.	59
Tabla 10. especificaciones controlador industrial PLC Siemens S7-1200 CPU1212C....	61
Tabla 11. Especificaciones controllino MINI.	62
Tabla 12. Especificaciones SPARTAN PLC Arduino.....	63
Tabla 13. Especificaciones Arduino ruggeduino.	64
Tabla 14. Diagrama de Pugh.....	66
Tabla 15. Parámetros Método Van Der Grinten	91
Tabla 16. Parámetros método Smith.	93
Tabla 17. Parámetro de diseño aplicado en la sintonización.	99
Tabla 18. Comparación de constantes Kp y Ki de los modelos matemáticos.....	106
Tabla 19. Parámetros de función de transferencia.	107
Tabla 20. Presupuesto del proyecto.	113

Lista de Apéndices

Apéndice A. Código Arduino 117

Resumen

Título: Diseño e implementación de un controlador PID de temperatura para un sistema dinámico térmico de un silo secador de café de dos pisos.

Autor: Sergio Andrés Gómez Gutiérrez y Iván Darío Santos Calderón

Palabras clave: Control, Temperatura, Sintonización, silo secador, variador de voltaje, caja negra, lugar geométrico de las raíces.

Descripción: El proyecto se enfoca en automatizar el control de temperatura en un silo secador estático de dos niveles regulando el flujo de biomasa hacia el quemador. En la fase inicial, se seleccionan componentes eléctricos y electrónicos con precisión, considerando requisitos eléctricos, restricciones presupuestarias y disponibilidad. Luego, se procede al montaje de la caja de control. Posteriormente, se aborda la modelación matemática de la variación de temperatura utilizando una metodología de "caja negra" que resulta en una ecuación resultante. Se lleva a cabo la modelación con tres enfoques diferentes para comparar y determinar la mejor opción del controlador. La sintonización del controlador se realiza mediante la técnica del "lugar geométrico de las raíces", que se revela altamente eficaz en el desarrollo del diseño. Se establecen requisitos críticos de diseño, como un tiempo de establecimiento menor a 1200 segundos y un porcentaje de sobrepaso inferior al 5%. La validación del controlador se efectúa a través de dos pruebas significativas. En la primera, se utiliza un solo punto de referencia para evaluar el rendimiento del controlador, mientras que en la segunda se establecen dos puntos de referencia para demostrar la capacidad del controlador de alcanzar temperaturas más altas que las originalmente sintonizadas. Como resultado, se observa una reducción sustancial en el tiempo de secado, pasando de 10-12 horas a 7-8 horas, lo que refleja una mejora notable en la eficiencia de la producción de secado.

Abstrac

Title: *Design and implementation of a PID temperature controller for a dynamic thermal system of a two-story coffee drying silo.*

Author(s): Sergio Andrés Gómez Gutiérrez y Iván Darío Santos Calderón

Key Words: *Control, Temperature, Tuning, dryer silo, voltage converter, black box, root locus.*

Description: *The project focuses on automating temperature control in a two-level static drying silo by regulating the flow of biomass to the burner. In the initial phase, electrical and electronic components are selected precisely, considering electrical requirements, budget constraints and availability. Next, the control box is assembled. Subsequently, the mathematical modeling of temperature variation is addressed using a "black box" methodology that results in a resulting equation. Modeling is carried out with three different approaches to compare and determine the best controller option. Controller tuning is performed using the "root locus" technique, which is found to be highly effective in design development. Critical design requirements are established, such as a settling time of less than 1200 seconds and an overshoot percentage of less than 5%. Controller validation is carried out through two significant tests. In the first, a single benchmark is used to evaluate the performance of the controller, while in the second, two benchmarks are established to demonstrate the controller's ability to achieve higher temperatures than originally tuned. As a result, a substantial reduction in drying time is observed, going from 10-12 hours to 7-8 hours, reflecting a notable improvement in the efficiency of drying production.*

Introducción

En Colombia el café es uno de los productos más importantes del país, pero ha ido en decadencia en los últimos años debido a la poca importancia dada por los gobiernos y el desaprovechamiento de los tratados de libre comercio además viene siendo afectado por el cambio climático ya que acontecimientos como el fenómeno de la niña y el niño propician la propagación de plagas además de una inadecuada floración de los cafetos, lo que ha llevado a bajar la productividad y calidad del mismo afectando directamente las exportaciones. “Según la Federación Nacional de Cafeteros, el país registró una producción de 12, 6 millones de sacos de 60 kilos de café en 2021, un 9 % menos respecto a la cosecha de 2020, que fue de 13, 9 millones de sacos. La caída dramática de la productividad del café está dada debido a una tardanza en la adopción de nuevas tecnologías y especies de cafetos más resistentes a las plagas.

Sin embargo, dentro del país la industria cafetera sigue teniendo una fuerte importancia económica y una de las mejores muestras es que esta actividad:

Representa un 22% del PIB agrícola y el 12% del agropecuario generando un importante número de ingresos para el país y casi 730mil empleos directos. Toda esta labor ha hecho que el grano de café colombiano sea reconocido como el mejor café suave del mundo. (Federación nacional de cafeteros,2020).

Por lo cual Colombia hoy debe andar en la búsqueda de nuevas especies y tecnologías que permitan elevar la productividad y calidad del café para mejorar la economía colombiana y por ende la de los productores y personas relacionadas con esta actividad. Con base a lo anterior el sector caficultor no ha tenido grandes avances en cuanto al desarrollo tecnológico.

En la producción de café se ven involucrados diferentes procesos después de la recolección del fruto, todo inicia con el despulpado del fruto en donde se retira la piel o pulpa a las cerezas de café (epicarpio). “Se realiza exclusivamente en el beneficio húmedo y preferiblemente deber hacerse antes de que se cumplan las seis horas de la recogida o cosecha; y así evitar el defecto conocido como fermento”. (Mundo Cafeto, 2019)

Luego del despulpado se realiza el desmucilaginado, en donde se retira el mucilago o baba (mesocarpio), el cual “está formado por más de 20 capas de células que cubre los dos granos; Constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de 5 mm de espesor, rico en azúcares”. (Vergara, 2020). En este punto se obtiene café pergamino lavado, el nombre de pergamino se debe a que en los procesos anteriores se retiró la cascara y el mucilago quedando expuesto el pergamino o cascarilla, el cual son dos capas de color crema y consistencia dura y frágil cuando se seca.

El café pergamino lavado se obtiene con una humedad promedio del 53% base húmeda-b.h. Para conservar la calidad del café se debe iniciar con el proceso de secado inmediatamente, ya que, si el café pergamino lavado se deja por más de 48 horas con la humedad inicial, existe un alto riesgo en ser atacados por hongos y ser contaminado con micotoxinas lo que hace que el grano pierda calidad e inocuidad, ocasionando su rechazo en los mercados nacionales e internacionales afectando los ingresos de los caficultores. (Parra et al, 2017, p.11)

Con base a lo anterior una de las razones por las que se seca el café hasta obtener humedades alrededor de los 12% b.h es para prevenir el crecimiento de hongos durante el almacenamiento. El flujo de aire es el medio común para transferir calor, extraer la humedad del grano y llevarlo al medio ambiente. Los factores que afectan el proceso de secado del grano son la temperatura, la superficie de contacto entre le grano y el aire de secado, y por último la humedad relativa del aire de secado (Soeswanto, et al, 2021).

Internacionalmente encontramos diferentes tecnologías existentes de secado de café, tal como; El secado de bandeja, también conocido como secador de lecho vibratorio donde el grano es puesto en unas charolas que vibran y a su vez pasa un flujo de aire transversal, siendo uno de los métodos de secado de café para obtener una distribución uniforme del secado; El secador rotatorio (guardiola), consiste en sistema de circulación de aire a través de conductos axiales donde se usan bajas temperaturas con altos flujos de masa de aire para así poder disminuir el contenido de humedad del grano; El secador fluidizado, consiste en un flujo vertical de aire caliente donde los granos están siempre en movimiento, permitiendo que la remoción de humedad sea uniforme para todo el lecho; Por último el secador de microondas; donde las ondas penetran el grano húmedo hasta la capa interna haciendo vibrar las moléculas de agua y así generar el calor necesario para evaporar la humedad (Soeswanto, et al, 2021).

En los diferentes estudios realizados por (Finzer, et al. 2005) citado por (Olmos, et al, 2017) se analizó la transferencia de calor y masa en el secado de café a través de charolas giratorias, en túneles de secado de lecho fijo vertical y frecuencia de vibración variable; concluyendo que el tiempo de secado disminuyó 11% a una temperatura de 45°C. Otros estudios realizados por (Burmester & Eggers, 2010) citado en Estado del arte de las tecnologías de secado de café en Colombia y su desarrollo global relaciona la velocidad de secado del aire, la conductividad térmica, los coeficientes de dispersión efectivos, la humedad, el volumen y la densidad de los granos de café; se concluye que la velocidad de secado está influenciada principalmente por la temperatura del aire de secado; sin embargo, esta temperatura está limitada por la sensibilidad a la temperatura del grano de café, al que una reducción en la humedad del aire tiene poca influencia en la velocidad de secado pero una fuerte influencia en el balance de humedad del café.

En Colombia se utilizan dos diferentes sistemas de secado como el solar y mecánico, el secado solar se utiliza en fincas con producciones anuales inferiores a los 3500 kg, para producciones superiores se utilizan sistemas mecánicos (Parra, et al, 2017, p.11). Los sistemas mecánicos más usados en Colombia son la Guardiola y el Silo estático siendo este último el más usado.

En Colombia, los secadores mecánicos utilizados para el café suelen regular su temperatura mediante un interruptor eléctrico de dos posiciones, es decir, un interruptor que se puede encender o apagar. Este interruptor tiene dos niveles de ajuste: uno bajo, que determina la temperatura a la que se activa el suministro de combustible, y otro alto, que indica la temperatura en la cual se detiene el suministro de combustible. (Parra et al, 2017, p.55).

Este sistema “on-off”, es uno de los más sencillos que puede obtenerse en un sistema de lazo cerrado el cual tiene la realimentación mediante un sensor de temperatura. El inconveniente con estos sistemas es que a pesar de tener los ajustes alto y bajo de temperatura por efecto de la inercia térmica propia del sistema de calentamiento del aire se llegan a temperaturas superiores de los 60°C ocasionando daños en la calidad del grano.

Otro sistema utilizado en el control de temperatura son los de lazo abierto en donde no se incorpora un sistema de medición para evaluar la señal de salida, pero al igual que el sistema de control “on-off” tiene inconvenientes ya que es sensible a los cambios de la temperatura ambiente, ya que en días soleados específicamente al medio día hay incrementos en la temperatura por encima de la deseada, este sistema no tiene en cuenta los cambios de temperatura ambiente.

Actualmente los secadores utilizados por pequeños y medianos cafeteros del Socorro, Santander, son de tipo guardiola, secador solar o secador estático; el más práctico y usado es el

secador estático, el cual cumple su función, pero no se han automatizado con un controlador de temperatura. De esta manera el control se hace de manera empírica y con supervisión, donde un operario conoce con que velocidades del motor de alimentación de biomasa (cascarilla de café) de la caldera se obtienen ciertas temperaturas, pero él mismo debe supervisar que no ocurran picos de temperatura por encima de la deseada.

Los picos de temperatura ocasionan un mal secado del café perdiendo las propiedades organolépticas tales como aroma y sabor e incurriendo en pérdidas económicas para los caficultores. Al tener una mayor precisión en el control de temperatura en el secado de café se conservan las propiedades organolépticas tales como aroma y sabor, ya que el café pergamino para ser comercializado debe tener una humedad entre 10% y 12% b.h (Parra et al, 2017).

Para los caficultores representa un gran costo cambiar de maquinaria para actualizarse a las nuevas tecnologías con controladores ya integrados, con base a lo anterior implementar un control de temperatura en secadores ya existentes y con una vida útil en producción es la mejor opción económicamente viable.

En vista de esta problemática se busca el diseño e implementación de un controlador PID de temperatura para un sistema dinámico térmico de un silo secador de café de dos pisos, utilizando un modelo matemático por medio de la ecuación de transferencia, sintonizando las variables y seleccionando los componentes electrónicos requeridos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Automatizar el control de temperatura de un silo secador de café de dos pisos, para mejorar la calidad del fruto y la eficiencia energética del proceso, además de contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander en innovar y dar solución a diferentes necesidades de la sociedad

1.2 Objetivos específicos

Modelar matemáticamente y simular el proceso de variación de temperatura de la planta térmica de un silo secador de café de dos pisos, por medio de la función de transferencia para obtener los parámetros requeridos para un controlador PID.

Sintonizar un controlador PID por medio de herramientas de diseño de control lineal para caracterizar la acción de control de la planta térmica.

Implementar un controlador PID continuo seleccionando los componentes electrónicos buscando la opción más viable para ser implementado en un silo secador de café industrial.

Validar el funcionamiento del controlador PID aplicado en el secador de café realizando un nuevo análisis del comportamiento de la temperatura para comprobar el funcionamiento correcto del sistema.

2. Marco teórico

El marco teórico de este proyecto recopila información de investigaciones previas y consideraciones teóricas, por lo que está dividido en dos secciones, la primera donde se citaron antecedentes o investigaciones realizadas a nivel internacional, nacional y regional referentes al tema de investigación. En segundo lugar, se indago sobre referentes teóricos con el fin de crear bases sólidas a partir del soporte teórico de los conceptos más importantes de la formulación del problema y los objetivos.

2.1 Antecedentes

Con base en la bibliografía consultada se estudiaron trabajos de grado y artículos de revistas científicas en los cuales se desarrollan sistemas de control de temperatura. A partir de esto se presenta el objetivo principal y el diseño metodológico que se aplicó en cada uno de estos trabajos, presentando los respectivos resultados y los aportes a la actual propuesta de investigación, según el lugar de aplicación: a nivel internacional, nacional y regional.

2.1.1 Internacional

En la Universidad Ricardo Palma de Lima Perú se desarrolló la tesis “Diseño de un sistema de secado automatizado para granos de café mediante transferencia térmica convectiva” (Cisneros & Aguilar Sivorichi, 2020). El cual tenía como objetivo diseñar un sistema de secado automatizado mediante transferencia térmica convectiva en donde se diseña la estructura mecánica y el sistema de control para que determine las condiciones del secado en función de los valores de temperatura y humedad para luego programar un PLC y por último diseñar el circuito electrónico y de potencia que permite controlar el sistema.

En los resultados del presente trabajo se logró diseñar el sistema automatizado en donde se utilizó un control PID en lenguaje LADDER, tomando como entrada las señales de temperatura y

humedad relativa, y mediante el controlador, preactuadores y actuadores dar una señal de respuesta que en este caso fue la temperatura, este proyecto logro aumentar la eficiencia en el tiempo de secado en relación al peso determinado de 25 Kg, en donde se mantuvo únicamente un control sobre la temperatura de los granos de café.

Este proyecto nos permite ver las diferentes maneras de diseñar un control PID, que en este caso fue mediante lenguaje LADDER; El cual es aplicable al proyecto de investigación.

2.1.2 Nacional

En la Universidad del Cauca, Popayán se desarrolló la monografía de trabajo de grado “Diseño de un control de humedad y temperatura para un secador de café” (Solarte & Sanches Reyes, 2010). En donde el objetivo principal es presentar un sistema que permite controlar la humedad del café sin utilizar un transductor de humedad, para ello se utilizó una maqueta que cumple con todas las características de la planta real, identificando mediante un algoritmo basado en la predicción de error Matlab pem, obteniendo un modelo que permite realizar técnicas de control lineal basadas en observador, se analizaron las distintas respuestas y se determina que el controlador basado en el modelo interno es el más adecuado ya que sigue un perfil predeterminado basado en una curva real de humedad implementado en Simulink.

En los resultados del presente trabajo se realiza el modelado a partir de variables que intervienen en el proceso de secado de café, y contando con la instrumentación adecuada, se demuestra que es posible plantear esquemas de control más elaborados que permitan el seguimiento de perfiles de humedad y temperatura del grano.

Este proyecto nos presenta la metodología del modelo MSU desarrollado por BakkerArkema et al (1974), adaptado por la Universidad Nacional a los silos de secado tipo Cenicafe (Parra, et al, 2008). El cual es un posible modelo para implementar en esta investigación.

2.1.3 Regional

En la Universidad Autónoma de Bucaramanga se desarrolló la tesis “Diseño de controlador PID para prototipo de máquina de secado de café y/o cacao para la empresa Penagos Hermanos” (Fuentes & Pinto Rojas , 2019). El principal objetivo fue crear un sistema de control PID de temperatura para un prototipo de máquina de secado de café y cacao de la empresa Penagos Hermanos. Para lograr esto, se diseñó un modelo matemático basado en ecuaciones que describen el comportamiento térmico de la máquina de secado de granos de esta empresa. Estas ecuaciones se han desarrollado utilizando información de la literatura especializada en operaciones unitarias en la industria. Este enfoque permite entender el comportamiento de la máquina, su tamaño y las variables que afectan el proceso industrial.

Además, se ha creado un modelo matemático basado en datos obtenidos directamente del secador. Luego, se compararon la eficacia de estos dos modelos, llegando a la conclusión de que son similares. Finalmente, se ha validado la estrategia de control utilizando técnicas de control lineal.

Este proyecto nos da una visión en cuanto a la determinación del modelo matemático ya que el proyecto descrito anteriormente realiza dos modelos matemáticos, uno llamado caja blanca en el cual es determinado mediante teoría de balance de masa y energía, ecuaciones de termodinámica por la cual obtuvieron una función de transferencia de primer orden, el otro modelo matemático denominado caja negra se obtuvo mediante datos experimentales del sistema y de igual manera se

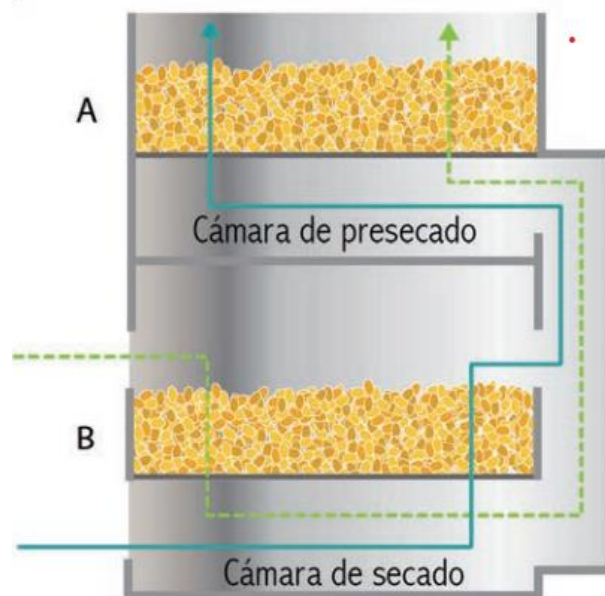
obtuvo una función de transferencia de primer orden. Además de generar aporte en cuanto sintonización y validación del controlador.

2.2 Referentes teóricos

2.2.1 Silo secador estático

Un silo secador estático de dos pisos es un secador de café, el cual consiste en secar capas estáticas con flujos de aire calientes, con inversiones de la dirección del aire para uniformizar el contenido de humedad final del grano. El secador consta de dos pisos uno de secado y otro de presecado [Ver Figura 1]. (Parra et al, 2017, p.p 6-16).

Figura 1. Esquema Funcionamiento secador de dos pisos con inversión de flujo.

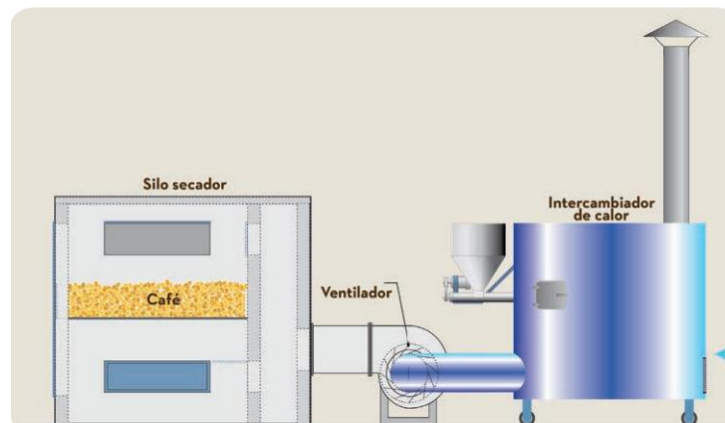


Nota: Dirección del flujo de aire al iniciar el secado (flecha en línea continua), el cual se invierte al cabo de unas horas (flecha en línea discontinua). (Parra et al, 2017, p.17).

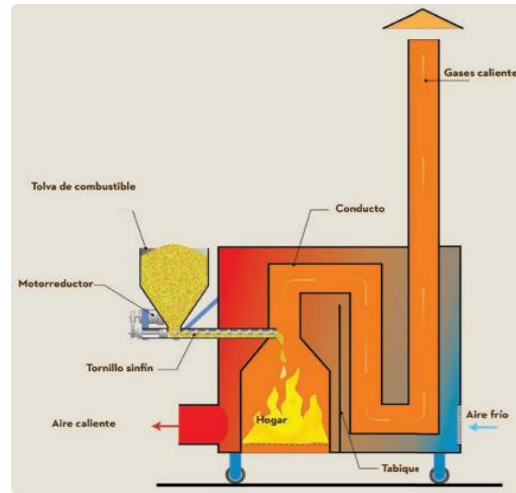
Una vez que el café de la parte inferior este seco, se retira y el café de la cámara de presecado se baja por unos ductos a la cámara de secado. Este secador está compuesto por un

ventilador centrífugo, un generador de aire caliente o intercambiador de calor y la cámara de secado. El generador está constituido por una tolva de almacenamiento de combustible sólido, un alimentador de tornillo sinfín, un motor AC, el hogar donde se efectúa la combustión, un sistema de ductos metálicos que conforman el intercambiador de calor, un conducto para los productos de la combustión y una entrada y una salida de aire caliente hacia el ventilador (Parra et al, 2017, p.50).

Figura 2. Componentes principales de un silo secador de dos pisos con inversión de flujo.



Nota: Se representa el esquemático de la planta térmica. (Parra et al, 2017, p.48).

Figura 3. Esquema del intercambiador de calor para el secado de café.

Nota: El intercambiador utiliza combustible sólido en este caso cisco de café (Cascarilla del café pergamino). (Parra et al, 2017, p.50).

2.2.2 Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema que se expresa mediante una ecuación diferencial lineal y que no varía en el tiempo se establece como la relación entre la transformada de Laplace de la salida, que es la respuesta del sistema, y la transformada de Laplace de la entrada, que es la señal de excitación. Esta definición se hace asumiendo que todas las condiciones iniciales del sistema son nulas. (Ogata, 2010).

Para un sistema lineal e invariante en el tiempo, la función de transferencia $G(s)$ es

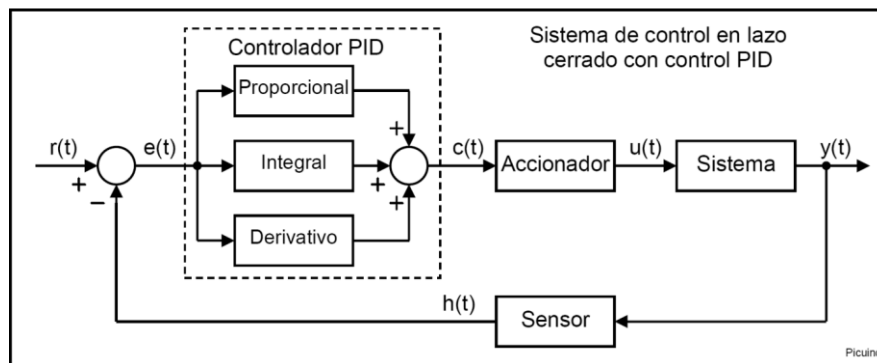
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1)$$

2.2.3 Control PID

El control PID es un mecanismo que mediante un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El

controlador PID tiene tres parámetros: ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa. El comportamiento de los controladores PID depende de las magnitudes relativas de estos tres parámetros. La determinación de las magnitudes relativas de estos tres parámetros se denomina sintonía de los controladores PID (Ogata, 2010).

Figura 4. Diagrama de bloques control PID



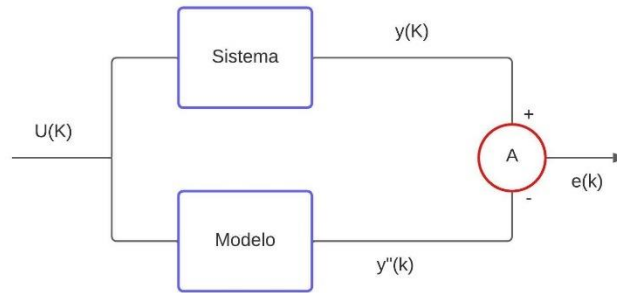
Nota: Tomado de Picuino

2.2.4. Modelado caja negra

Es una metodología en la cual se generan modelos matemáticos para tratar de predecir el comportamiento de un sistema real, no es necesario conocer cómo funciona exactamente un sistema, en este método se obtienen soluciones aproximadas y estas son validadas mediante técnicas estadísticas con ayuda de software. (Cardona, J. Leal, & E. Ustariz, 2020).

Es decir, en este método de diseño el modelo matemático se obtiene a partir de pruebas experimentales sin conocimiento de los detalles validando con técnicas estadísticas con ayuda de software.

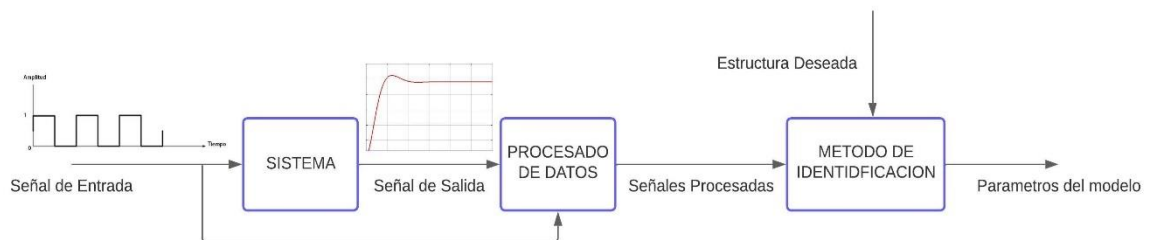
Figura 5. Comparación modelo vs sistema.



Nota: Tomado de Autores

La señal $e(k)$ es la señal de entrada tanto al sistema como al modelo que es una expresión matemática que se aproxima al comportamiento del sistema, y el sistema es un sistema físico del mundo real es decir el sistema y el modelo son diferentes, las señales $y(k)$ y $y''(k)$ son las señales de salida real y modelada respectivamente y se comparan obteniendo la señal $e(k)$ que es la señal de error.

Figura 6. Método Caja Negra.



Nota: Tomado de autores

2.2.4 Método de estimación caja negra Van der Grinten

Es un método de estimación de función de transferencia de caja negra, este método se basa en la respuesta de escalón, es un método gráfico. La función de transferencia tiene el siguiente modelo.

$$G(S) = K \frac{e^{-\tau_d S}}{(\tau_1 S + 1) * (\tau_2 S + 1)} \quad (2)$$

Donde,

$$K = \frac{\text{Valor Estado Estable Salida}}{\text{Valor Estado Estable Entrada}} \quad (3)$$

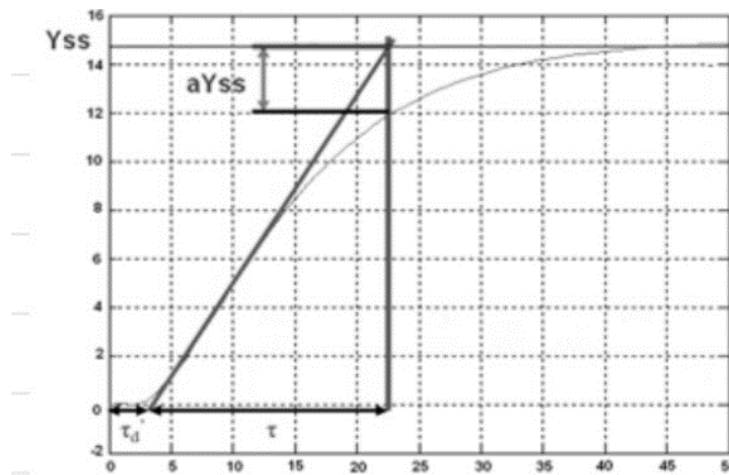
$$\tau_1 = \tau \frac{3ae - 1}{1 + ae} \quad (4)$$

$$\tau_2 = \tau \frac{1 - ae}{1 + ae} \quad (5)$$

$$\frac{1}{3e} < a < \frac{1}{e} \quad (6)$$

$$\tau_d = \text{Tiempo retardo} \quad (7)$$

Figura 7. Método Eye Ball-Smith.



Nota: Tomado de (Ogata, 2010)

2.2.5 Método de Estimación caja negra Smith

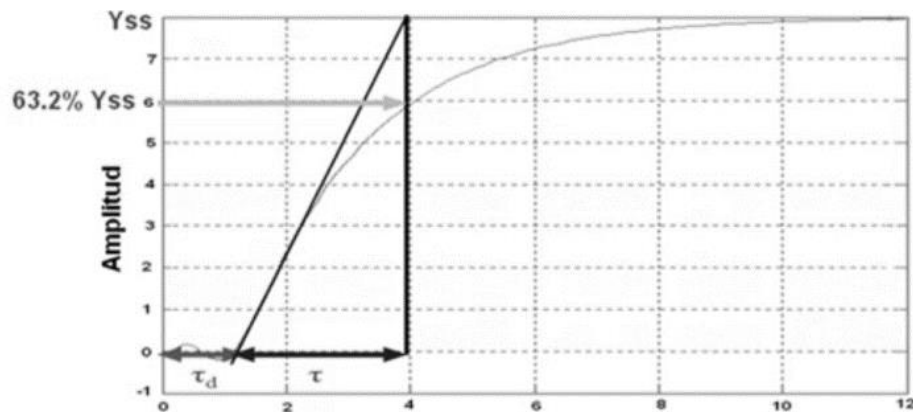
Es un método de estimación de función de transferencia de caja negra, este método se basa en la respuesta de escalón, es un método gráfico. La función de transferencia tiene el siguiente modelo.

$$G(S) = K \frac{e^{-\tau_d S}}{(\tau S + 1)} \quad (8)$$

Donde,

$$K = \frac{\text{Valor Estado Estable Salida}}{\text{Valor Estado Estable Entrada}} \quad (9)$$

Figura 8. Método Smith

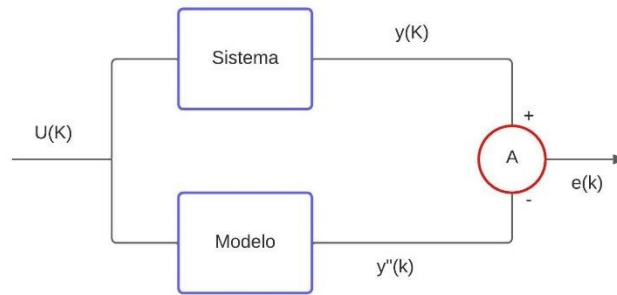


Nota: Tomado de (Ogata, 2010)

2.2.6 Método de estimación Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin)

El método de Isqnonlin es un método donde minimiza la señal del error que resulta de la comparación de las señales de salida de un sistema real y del modelo matemático que intenta predecir el comportamiento del sistema, ese método resuelve problemas de mínimos cuadrados no lineales, en donde realiza el ajuste de la curva, esto lo realiza encontrando un vector x que es un minimizador local para una función que sea una suma de cuadrados (MathWorks, 2023).

Figura 9. Comparación sistema vs modelo.



Nota: Tomado de Autores

A continuación, se plantea el desarrollo del método, se asume un modelo general donde la salida modelada va a depender de los valores anteriores de la salida y de las entradas actuales y anteriores del sistema por lo cual el sistema tiene memoria, es decir el sistema depende de los “q” valores anteriores y de (p+1) valores de entrada.

$$y''(k,\theta) = a_1 y''(k-1) - a_2 y''(k-2) + \dots + a_q y''(k - q) \quad (10)$$

$$+ b_0 u(k) + b_1 u(k - 1) + \dots + b_p u(k - p)$$

Donde se define el siguiente vector:

$$\theta = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_q \quad b_0 \quad \dots \quad b_p]^T \quad (11)$$

Cuando se aplica la transformada Z a nuestro sistema se obtiene la siguiente función de transferencia.

$$Y = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_p Z^{-p}}{1 - a_1 Z^{-1} - a_2 Z^{-2}} U(Z) \quad (12)$$

La transformada Z es una generalización de la transformada de Fourier, ya que esta última no converge para todas las secuencias, es decir cubre una más amplia gama de señales. La

transformada Z transforma una señal real o compleja que está definida en el dominio del tiempo discreto en una definida en el dominio de la frecuencia compleja. (Jimenez, 1997)

Ahora para encontrar el vector de parámetros θ se define un problema de optimización y se define la función de costo:

$$J(\theta) = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^N (e(k))^2 = \frac{1}{2N} \sum_{K=0}^N (y(k) - y''(k))^2 = \frac{1}{2N} \sum_{K=0}^N (y(k) - y''(k, \theta))^2 \quad (13)$$

Esta última es una función escalar de varias variables de θ la cual tiene que minimizarse, para minimizar una función de varias variables se necesita encontrar el gradiente de esa función y igualarla a cero.

$$\nabla_{\theta} = J(\theta) \quad (14)$$

Para ello se escribe la salida del modelo [Ecuación 10] como una multiplicación de dos vectores

$$y''(k, \theta) = [y''(k-1), y''(k-2), \dots, y''(k-q), u(k), u(k-1), \dots, u(kp)] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_q \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} \quad (15)$$

\downarrow
 Regresor $\varphi^T(k)$

\downarrow
 θ

Este regresor es dependiente del tiempo, por lo tanto, la salida de la planta se puede escribir como:

$$y(k, \theta) = \varphi^T(k) * \theta \quad (16)$$

Ahora se definen las salidas de la planta y del modelo de manera matricial

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{bmatrix} \quad (17) \quad Y'' = \begin{bmatrix} y''(0, \theta) \\ y''(1, \theta) \\ \vdots \\ y''(n, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi^T(0) \\ \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(n) \end{bmatrix} * \theta \quad (18)$$

Teniendo las ecuaciones 17, 16, y 18 se puede escribir la ecuación 13 de la siguiente manera:

$$J(\theta) = \frac{1}{2N} * (Y - Y'')^T * (Y - Y'') = \frac{1}{2N} * (Y * \Psi * \theta)^T * (Y * \Psi * \theta) \quad (19)$$

\downarrow
 $\Psi = \text{MATRIZ}$

Acomodando la ecuación se obtiene la siguiente igualdad:

$$\begin{aligned} (Y - \Psi * \theta)^T * (Y - \Psi * \theta) &= Y^T Y - Y^T \Psi \theta - \theta^T \Psi^T Y + \theta^T \Psi^T \Psi \theta \\ &= \theta^T \Psi^T \Psi \theta - 2(\Psi^T Y)^T \theta + Y^T Y \end{aligned} \quad (20)$$

Obteniéndose

$$J(\theta) = \theta^T \Psi^T \Psi \theta - 2(\Psi^T Y)^T \theta + Y^T Y \quad (21)$$

La función de la ecuación 21 es la función que debe minimizarse para ello se debe determinar el gradiente de $J(\theta)$ respecto a θ e igualado a cero, para lograr ello se apoya en las siguientes propiedades de algebra:

$$\nabla_{\theta} q^T \theta = q \quad (22)$$

$$\nabla(\theta^T A \theta) = 2A\theta \quad (23)$$

Aplicando estas propiedades sobre el gradiente de la función de costo (Ecuación 21) se obtiene:

$$\nabla_{\theta} J(\theta) = 2\Upsilon^T \Upsilon \theta - 2\Upsilon^T Y = 0 \quad (24)$$

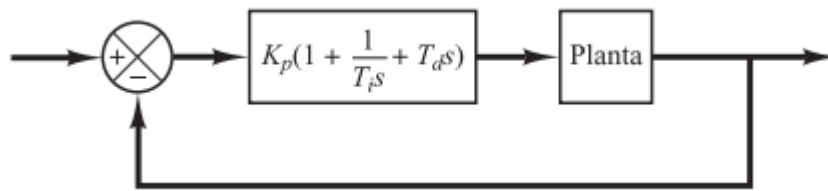
$$\theta = [\Upsilon^T \Upsilon]^{-1} * \Upsilon^T Y \quad (25)$$

El término Υ se conoce puesto es una matriz que se halló en la ecuación 19 y “Y” se conoce pues la respuesta de nuestro sistema, de esta manera se halla el valor de θ el cual es el óptimo para el modelo planteado, para este método es necesario de la verificación con Matlab.

2.2.4 Herramientas de control lineal

Teniendo el modelo matemático de la planta, es necesario aplicar una técnica de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador, cuando la complejidad de la planta es tal que resulta difícil obtener su representación matemática, tampoco es viable emplear un enfoque analítico para diseñar un controlador PID. En estas circunstancias, es necesario utilizar métodos experimentales para ajustar los controladores PID.

La acción de ajustar los parámetros de un controlador de manera que satisfagan las expectativas de rendimiento establecidas se denomina sintonización del controlador. Ziegler y Nichols propusieron directrices para la calibración de los controladores PID (lo que implica determinar los valores de K_p , T_i y T_d) a partir de datos obtenidos de respuestas a escalones en experimentos o al identificar el valor de K_p que resulta en estabilidad marginal cuando solo se aplica la acción de control proporcional. (Ogata, 2010).

Figura 10. Control PID de una planta.

Nota: Tomado de (Ogata, 2010).

También existen otros modelos de sintonía de controladores que es el método del lugar geométrico de las raíces, en esta a partir de unos requerimientos de diseño se ubican los polos y ceros en el plano geométrico de tal manera que se cumplan los requerimientos.

2.2.4.1 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID

Ziegler y Nichols introdujeron pautas para deducir los valores de la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d , tomando en cuenta la respuesta temporal de una planta específica. Los ingenieros pueden realizar esta determinación de los parámetros de los controladores PID o la afinación de los controladores PID a través de experimentos en la planta. Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols, se han desarrollado diversas reglas para la sintonización de controladores PID. Estas directrices se encuentran disponibles en publicaciones técnicas y también en la documentación proporcionada por los fabricantes de estos controladores. (Ogata, 2010).

Figura 11. Regla de sintonía de 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	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Nota: Tomado de (Ogata, 2010).

2.2.4.2 Sintonización por el método del lugar geométrico de las raíces

Este método permite representar gráficamente la posición de los polos de un sistema de lazo cerrado cuando se altera un parámetro, generalmente son las ganancias K. (Castillo, 2020)

La dinámica de un sistema de control retroalimentado queda definida por medio de su función de transferencia, y cuya ecuación característica es el polinomio del denominador igualado a cero dando como resultado los polos del sistema que son las raíces de esta ecuación, estos polos me indican si el sistema es estable o inestable. (Castillo, 2020)

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \quad (26)$$

Donde,

$$Q(s) = 0 \quad \text{Ecuación Característica de una función de transferencia}$$

Este método consiste en definir unos requerimientos de diseño tales como definir que el tiempo de establecimiento sea menor al real y el porcentaje de sobre salto de la función sea menor

al 5%, una vez definido estos parámetros se procede a graficar y se ubican los polos y ceros de tal manera que cumplan los parámetros.

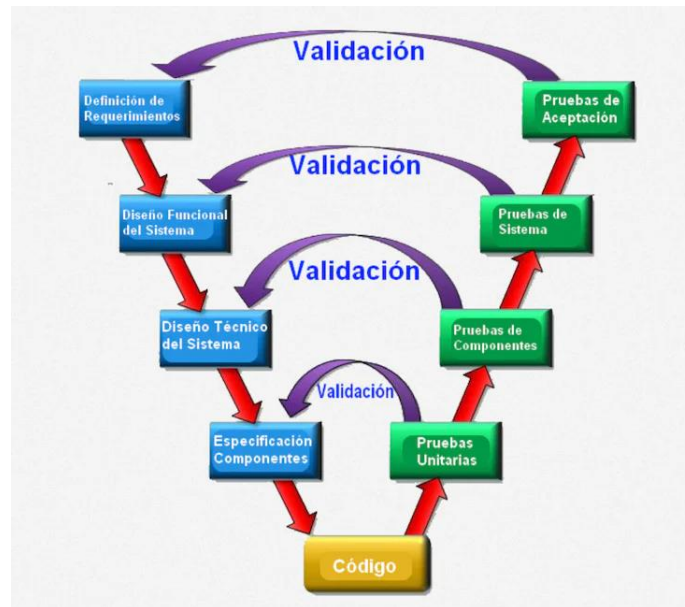
3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

La investigación con enfoque mixto busca responder a problemas de investigación utilizando las técnicas de los enfoques cualitativos y cuantitativos donde se aborda la complejidad de estos problemas de investigación para tener una mejor comprensión del problema y dar respuesta en base a un enfoque holístico. (Ortega, 2015)

Con base a lo anterior, este proyecto tiene un enfoque mixto pues ya que utiliza las técnicas del enfoque cuantitativo (cálculos, análisis de resultados y resultados), y el enfoque cualitativo (soluciones para la sociedad, mejoramiento de las condiciones socioeconómicas, entre otras). Este enfoque mixto ayudará a la solución del problema de investigación planteado en este proyecto ya que responderá en la parte del diseño.

En este proyecto se utilizará el método en V para el diseño e implementación de un controlador PID de temperatura para un sistema dinámico térmico de un silo secador de café de dos pisos, esta metodología muestra “las relaciones entre cada fase de desarrollo y la fase de prueba asociada. También se lo conoce como el modelo de verificación y validación. Esto se debe a que cada fase de verificación está asociada con una fase de validación” (Ricardo, 2020). Este modelo es muy utilizado en ingeniería para el diseño e implantación de sistemas mecánicos y software.

Figura 12. Método de diseño en V.

Nota: Tomado de (Cera, 2021)

3.2 Técnicas y procedimientos aplicados para resolver los objetivos

3.2.1 Modelar matemáticamente el proceso de variación de temperatura de la planta.

En esta parte se realiza una investigación sobre los modelos matemáticos existentes en la literatura los cuales sean aplicables a nuestro diseño.

Paso 1: Realizar una consulta en la literatura de los modelos matemáticos existentes para modelar el proceso de variación de temperatura de una planta térmica.

Paso 2: Determinar la posible aplicación de cada modelo al trabajo de investigación, teniendo en cuenta variables teóricas y experimentales.

Paso 3: Validar la exactitud de los modelos matemáticos y determinar cuál modelo es el más próximo a las condiciones reales de la planta térmica

Paso 4: Analizar el modelo matemático que describirá el comportamiento térmico del trabajo de investigación.

3.2.2 Sintonizar un controlador PID por medio de herramientas de diseño de control lineal

Esta parte consiste en definir cual metodología de sintonización es la más adecuada y aplicable al modelo matemático, donde se analiza el control PID a utilizar y aproximaciones a la realidad.

Paso 1: Realizar una consulta de trabajos similares, donde la sintonización es aplicada a diferentes sistemas de control tal como posición, nivel, temperatura, etc.

Paso 2: Definir el comportamiento que debe tener nuestro sistema de control, donde se determina la señal de entrada y salida optima del sistema.

Paso 3: Sintonizar y validar el funcionamiento del modelo matemático

3.2.3 Implementar el controlador PID continuo al silo secador de dos pisos

En esta parte consiste en implementar el controlador PID a partir de la selección de componentes y construcción de este.

Paso 1: Definir los dispositivos electrónicos que cumplan con los requerimientos del sistema teniendo en cuenta costo/beneficio y que estén disponibles en la zona.

Paso 2: Realizar una consulta de controladores, PLC y diferentes dispositivos disponibles en el mercado para ser integrado al controlador PID.

Paso 3: Construir el controlador PID para luego ser implementado en el silo secador de café.

3.2.4 Validar el funcionamiento del controlador PID

En esta parte consiste en validar el diseño aplicado al silo secador de dos pisos y verificar que el diseño cumple con los requerimientos.

Paso 1: Tomar datos de temperatura del sistema.

Paso 2. Generar una gráfica de T vs t para ver el comportamiento de la temperatura.

Paso 3. Verificar que la curva de temperatura medida cumpla con el comportamiento esperado.

3.3 Método en V

3.3.1 Definición de requerimientos

Requerimientos del sistema

Tabla 1. Requerimientos del sistema

Elementos	Factores de relevancia	Prioridad
Temperatura de aire de secado	Temperaturas de secado superiores a los 60°C ocasionan daños en las propiedades organolépticas del grano. La temperatura de secado que desea es 55°C	Alta
Salida del grano seco	La extracción del café seco se realiza de manera manual y al ser una máquina que no está en una línea continua de producción, no se ve la necesidad de modificarlo	Baja
Humedad	La humedad requerida para el almacenamiento de café debe rondar el 12% bh; el control de esta se realiza de manera manual ya que no existe un control de humedad para granos de bajo costo.	Baja
Presupuesto	Se dispone de un presupuesto de \$2'000.000 para la compra de componentes.	Alta

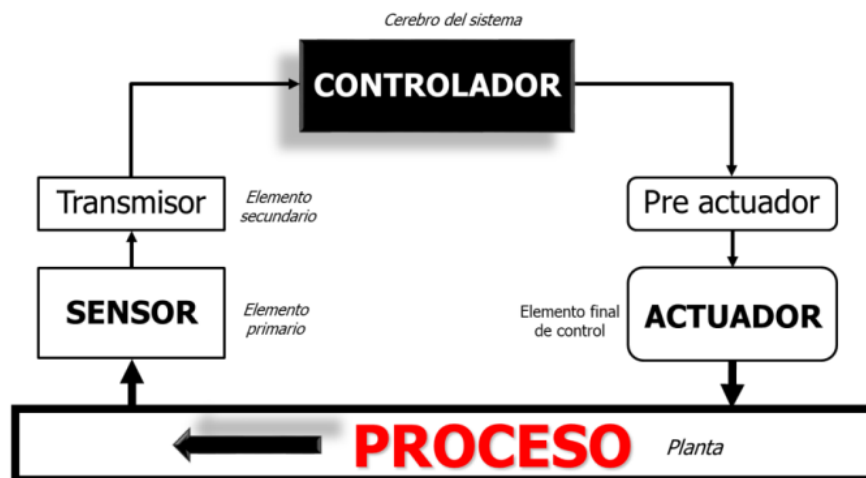
Nota: Elaborado por autores

3.3.2 *Diseño funcional del sistema*

Se requiere el diseño de un controlador capaz de controlar la temperatura de secado para garantizar que se encuentre alrededor de 55°C de esta manera poder mantener las propiedades organolépticas del café. El controlador debe regular la temperatura del aire extraído del intercambiador que tiene como fuente de calor el hogar del secador dado por la combustión del cisco, este control de temperatura se realiza controlando el flujo masico de biomasa, en ultimas la velocidad del motor AC del tornillo sinfín.

Cabe destacar que el diseño trata de un sistema de control de lazo cerrado y todo sistema de control de lazo cerrado está compuesto por 5 componentes fundamentalmente, el sensor, el transmisor, controlador, preactuador y actuador.

Figura 13. Componentes de un lazo de control.

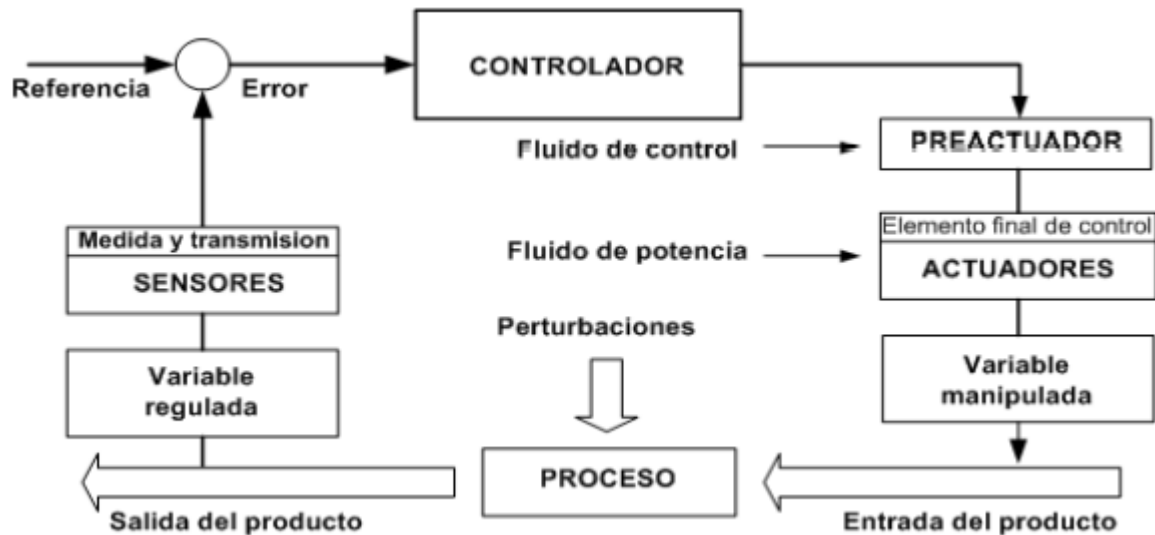


Nota: Tomado de (Meneses, 2020)

Bajo esta premisa y ya que el sistema a diseñar consiste en implementar un control PID a una planta térmica, es decir que el control de temperatura sea automático, y por el hecho de ser automático el diseño de este control se basara en el concepto de lazo cerrado.

Se define que la **variable regulada** o variable del proceso será la temperatura $T(t)$ de aire caliente, la cual tendrá un set point de 55°C . La **variable por manipular** será el flujo de biomasa \dot{m} que ingresa al quemador por medio de un tornillo sinfín accionado por un motor AC de 110 V.

Figura 14. Control de procesos automáticos.



Nota: Tomado de (Meneses, 2020)

- Referencia: Sera el set point 55°C
- Controlador: Se plantean posibles alternativas de controladores disponibles en el mercado y que estén dentro del presupuesto.
- Preactuador: Se plantea usar un dimmer ya que se va a variar la velocidad de un motor AC
- Actuadores: Sera el motor AC que acciona el tornillo sinfín.
- Variable Manipulada: Flujo masico de biomasa (cisco)
- Proceso: Sera la combustión de la biomasa y esta calor será extraído por el intercambiador que calentará el aire para el secado

- Variable regulada: La temperatura del aire caliente de secado
- Sensores: Sensor de temperatura y un encoder, este último para medir la velocidad del tornillo sinfín.

4. Selección de componentes electrónicos

4.1 Sensores de temperatura

El sensor de temperatura es relevante para esta aplicación, ya que dependiendo de la precisión y la rapidez de reacción nos dará datos fiables para poder establecer los parámetros iniciales de nuestro control. Actualmente se conocen distintos sensores de temperatura tal como termopar, RTD y termistor, cada uno de ellos cuenta con diferentes características las cuales serán evaluadas a continuación:

Tabla 2. Comparación Sensores de temperatura.

CRITERIO	TERMOPAR	RTD	TERMISTOR
Rango de temperaturas	de -268°C a 2316°C aproximadamente	-240°C a 650°C aproximadamente	-74°C a 260°C aproximadamente
Estabilidad a largo plazo	Deficiente a razonable	a Buena	Deficiente
Precisión	Media	Alta	Media
Sensibilidad (salida)	Baja	Media	Muy alta
Linealidad	Razonable	Bueno	Deficiente
Auto calentamiento	Bajo	Muy bajo a bajo	Alto
Sensibilidad de punto (extremo)	Excelente	Razonable	Bueno
Efecto inicial	Alto	Medio	Bajo

Tamaño/embalaje	Pequeño a grande	Mediano	a	Pequeño	a
		pequeño		mediano	

Nota: Tomado de: WATLOW

Después de conocer las características de cada uno, se determina la opción aplicable al proyecto el cual se escoge un sensor de funcionamiento RTD.

4.1.1 Sensor PT100:

Es un sensor de temperatura que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. En un extremo está el elemento sensible (Sensor RTD) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal). Los sensores PT100 tienen la capacidad de proporcionar precisión hasta la décima parte de un grado. Una ventaja significativa de los sensores PT100 es que no tienden a degradarse gradualmente y proporcionar lecturas incorrectas; en su lugar, suelen fallar al abrirse. Esto significa que los dispositivos de medición pueden detectar de inmediato cualquier fallo en el sensor y emitir una señal de advertencia. Esta característica representa una gran ventaja en cualquier tipo de dispositivo en el que una desviación no detectada en la medición de la temperatura pudiera causar daños significativos.

Figura 15. Sonda sensor PT100.

Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

Características

Tabla 3. Especificaciones sensor PT100.

Rango temperatura	de	-200 °C a 850 °C
Precisión		$\pm 0,1$ °C
Resistencia nominal		100 Ω a 0°C

Nota: Elaborado por autores

4.1.2 Acondicionamiento de señales

En este caso la señal dada por la PT100 es una variación de resistencia (ohm) así que es necesario utilizar diferentes dispositivos y/o módulos para que esta pueda ser leída por el controlador.

- Conversor RTD PT100 a 4~20mA (0°C ~ 150°C) Riel DIN

Este dispositivo se encargará de generar una señal de 4 a 20 mA según la variación de resistencia generado por la PT100.

Figura 16. Conversor RTD PT100 a 4~20mA (0°C ~ 150°C) Riel DIN.



Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

Características

Tabla 4. Especificaciones conversor RTD PT100 a 4~20mA (0°C ~ 150°C) Riel DIN.

Rango de medición	0°C hasta 150°C
Salida de señal estándar internacional	4~20mA
Precisión	±0.2%

Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

- Módulo Convertidor De Señal Corriente A Voltaje 4-20ma A 0-10V

Este dispositivo se encargará de tomar la señales mA y convertirla en voltaje, variando desde un rango de 0 a 10 voltios.

Figura 17. Módulo Convertidor De Señal Corriente A Voltaje 4-20ma A 0-10V.



Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

4.2 Encoder

- Rotary Encoder E50S8-600-3-T-24

Es un dispositivo de detección que proporciona una respuesta. Los Encoders convierten el movimiento en una señal eléctrica que puede ser leída por algún tipo de dispositivo de control en un sistema de control de movimiento. El encoder envía una señal de respuesta que puede ser utilizado para determinar la posición, contar, velocidad o dirección. Un dispositivo de control puede usar esta información para enviar un comando para una función particular.

Figura 18. Encoder.

Nota: Tomado de Autonics

Características

Tabla 5. Especificaciones Encoder E50S8-600-3-T-24.

Diámetro	50 mm
Diámetro eje	8 mm
Pulsos / Revolución	600
Fases de salida	3 (A, B, Z)
Tipo de salida	Salida de tótem
Fuente de alimentación	12-24VDC $\pm 5\%$

Nota: Elaborado por autores

4.3 Fuente de alimentación

- Fuente 24VDC 10A 240W RIEL DIN INP 85/264VAC MORNSUN

Figura 19. Fuente 24VDC 10A 240W RIEL DIN INP 85/264VAC MORNSUN.

Nota: Tomado de Electrónicas DC

Características

Tabla 6. Especificaciones Fuente 24VDC 10A 240W RIEL DIN INP 85/264VAC MORNSUN

Voltaje de entrada	110/220V \pm 20%
Voltaje de salida	24V
Corriente de salida	10A
Dimensiones	110x78x36mm

Nota: Elaborado por autores

4.4 Caja de control

Sera la base y la que albergara todo el sistema físico del controlador, además de esto llevara lo habitual tal como: rieles, borneras y protecciones para el sistema eléctrico, tiene grado de protección IP60.

Figura 20. Caja de control.



Nota: Tomada por autores

4.5 Control del motorreductor monofásico

En el desarrollo del proyecto se planeaba controlar el motorreductor monofásico implementado un dimmer con interfaz Arduino que genere una señal PWM. Se adquiere el módulo dimmer digital 1ch 1kw para arduino triac bta312 – sutagao. El cual en especificaciones nos permite controlar la intensidad lumínica de un bombillo, variar la intensidad de calor que produce una resistencia, controlar la corriente de entrada de cualquier carga inductiva o resistiva por medio de un PWM que puede estar sincronizado con la red eléctrica, y por último controlar la velocidad de un motor monofásico.

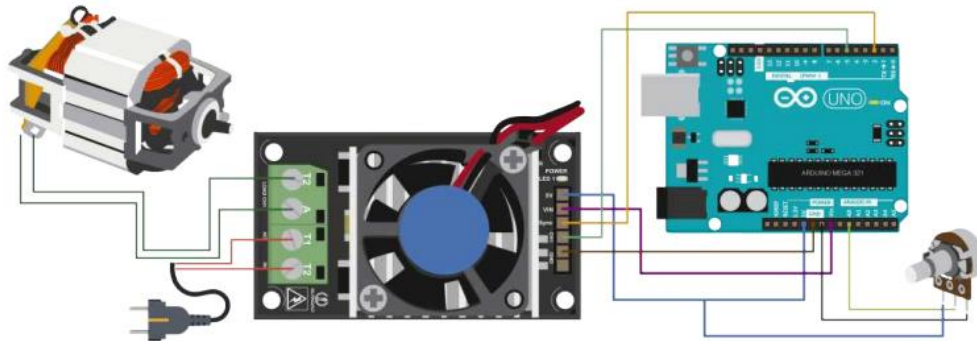
Figura 21. Módulo dimmer digital 1ch 1kw para arduino triac bta312 - sutagao.



Nota: Tomado de Vistronica

Inicialmente se realiza el montaje del dimmer y el motorreductor para comprobar el funcionamiento del dimmer. En el montaje se utiliza un Arduino Uno y un potenciómetro como se muestra en la siguiente figura, se realiza las conexiones correspondientes y se pone a prueba. Inicialmente el eje del motor no gira, se utiliza todo el rango del potenciómetro y el eje no presenta ningún movimiento.

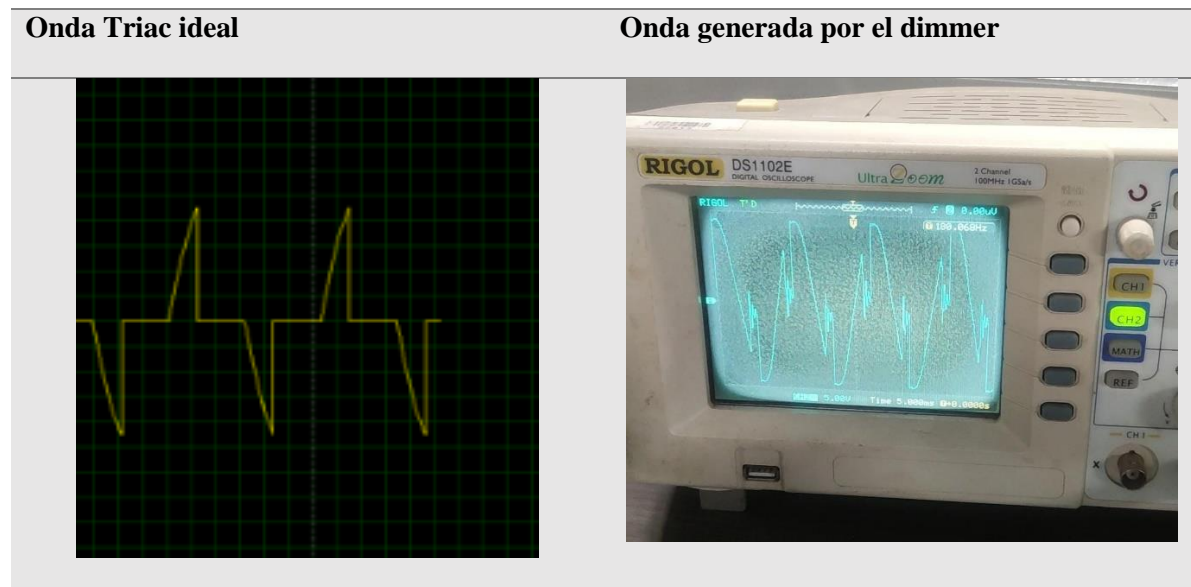
Figura 22. Circuito Dimmer-Motorreductor.



Nota: Tomado de Vistrónica

Se utiliza un osciloscopio para comprobar el funcionamiento del dimmer y comprobar la función Triac que este debe realizar al graficar el voltaje. A continuación, se muestran los resultados del osciloscopio:

Tabla 7. Comparación entre onda Triac vs generada por el dimmer.



Nota: Tomado de autores

La onda del Triac ideal presenta un corte en la onda sinusoidal donde según la variación de potenciómetro presenta una mayor o menor porción de la onda, de esta manera genera un control sobre los motores AC. En la onda generada por el osciloscopio donde se prueba el dimmer se evidencia un comportamiento distinto al esperado, el recorte de la onda sinusoidal no es completo y presenta cierta inconsistencia.

Se decide evaluar el comportamiento del controlador que ya contaba la maquina en operación, de esta manera fue necesario hacer el montaje del controlador de velocidad para motor 110VAC de 60W –motorreductor.

- Controlador de velocidad para motor 110VAC de 60W

Controlador de velocidad para motores de corriente alterna de 110V 60W. Con opción de selección de dirección de giro.

Figura 23. Controlador de velocidad para motor 110VAC de 60W.



Imagen usada como referencia

Nota: Tomado de didácticas electrónicas

Características:

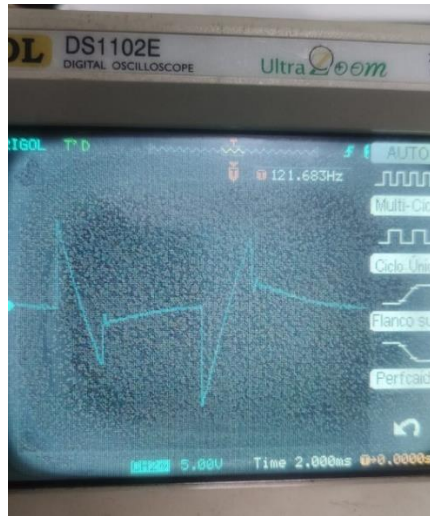
Tabla 8. Especificaciones controlador de velocidad para motor 110V AC de 60W.

Voltaje nominal	110V, 50/60Hz
Potencia	60W
Conector	6 pines
Interruptor	On/Off
Giro del eje	Permite seleccionar la dirección de giro del motor (Para hacer el cambio el motor debe estar quieto)
Longitud del cable	60cm

Nota: Tomado de didácticas electrónicas

El montaje fue realizado en laboratorio con el controlador de velocidad y motorreductor correspondiente, mostrando los siguientes resultados

Figura 24. Onda generada por controlador de velocidad.



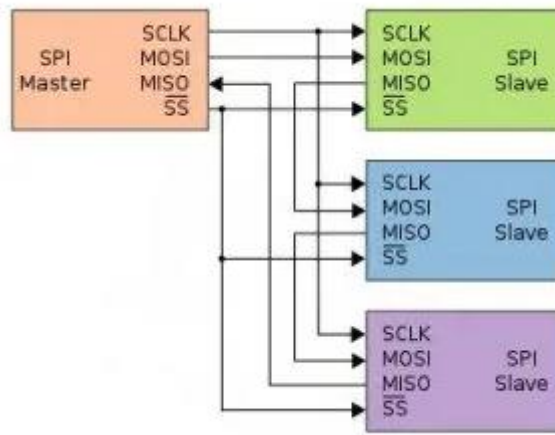
Nota: Tomado de autores

La grafica dada por el osciloscopio es homologa a la del Triac, es decir, cumple con la función de interrumpir la corriente alterna para así poder variar el voltaje de entrada del motor y poder modular su velocidad.

Una de las opciones a tomar en cuenta era automatizar la acción del potenciómetro por medio de potenciómetros digitales controlado por el controllino, lo siguiente es validar el potenciómetro que utilizaba el controlador.

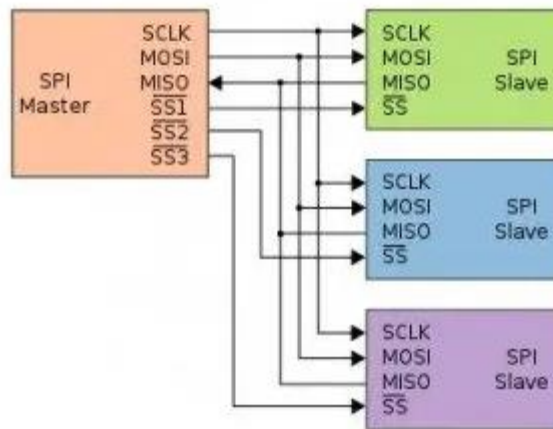
El potenciómetro presente en el controlador cuenta con una resistencia de 20K ohm, en el mercado fue difícil encontrar un potenciómetro digital de la misma resistencia, por siguiente fue necesario implementar dos potenciómetros digitales de 10K cada uno que emularan la acción de uno de 20K. Para poder relacionar estos dos potenciómetros es necesario utilizar la comunicación maestro-dos esclavos implementando el bus SPI (Serial Peripheral Interface).

Figura 25. Comunicación SPI tipo encadenado.



Nota: Tomado de Panahitek

Figura 26. Comunicación SPI tipo paralelo

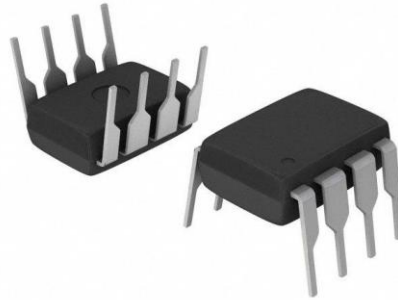


Nota: Tomado de Panahitek

4.6 Potenciómetro digital 10KΩ DIP-8

Potenciómetro digital de 10KΩ, cuenta con 128 posiciones lineales. Es una alternativa de bajo costo para reemplazar los potenciómetros mecánicos. Encapsulado 8-PDIP.

Figura 27. potenciómetro digital.



Nota: Tomado de didácticas electrónicas

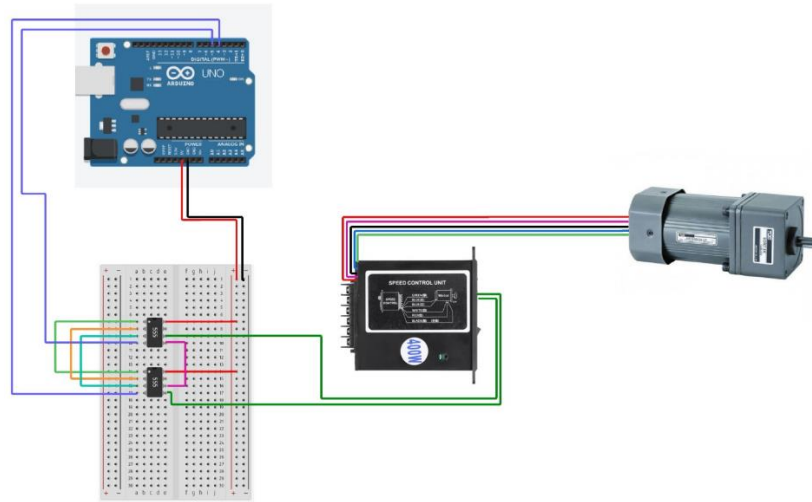
Características:

Tabla 9. Especificaciones Potenciómetro digital 10KΩ DIP-8.

Voltaje de operación	4.5V ~ 5.5V
Resistencia	10KΩ
Voltaje de entrada potencia	110V/220V AC
Control: Digital o por medio de dos pushbutton	2 botones pulsadores
Número de posiciones	128
Temperatura de funcionamiento	- 40°C ~ 85°C

Nota: Elaborado por autores

Para poder integrar los potenciómetros en la caja de control se diseña un circuito impreso (PCB). De esta manera la integración de los potenciómetros en el sistema de control se representa en la siguiente figura:

Figura 28. Esquema conexión potenciómetro.

Nota: Tomado de autores

4.7 Selección del PLC

Inicialmente se plantean 4 posibles alternativas para dar solución al trabajo de investigación, en cuanto a controladores donde se plantea el uso de un controlador industrial PLC Siemens S7-1200, controllino mini Arduino, Spartan PLC Arduino, o implementar un sistema embebido que cumpla con los requerimientos del sistema, y que sea el más adecuado ya que el proyecto requiere de un controlador con una aplicación específica.

4.7.1 Alternativa 1: Sistema con control industrial PLC

En el mercado se encuentra diferentes PLC entre modelos y marcas, encontramos:

- PLC Siemens S7-1200 CPU1212C

Figura 29. PLC Siemens S7-1200 CPU1212C.



Nota: Tomado de didácticas electrónicas

CPU PLC permite realizar automatización de tareas sencillas Y precisas. Con entradas digitales y análogas integradas. Salidas Relé y entradas rápidas integradas. Bloques de control PID y de comunicación entre equipos.

Características:

Tabla 10. especificaciones controlador industrial PLC Siemens S7-1200 CPU1212C.

Tensión de alimentación:	4 - 28 VDC
Consumo (valor nominal):	500mA, solo CPU
Número de entradas digitales:	8
Número de salidas digitales	6
RELE:	
Número de entradas analógicas:	2

Nota: Elaborado por autores

4.7.2 Alternativa 2: Controllino MINI Arduino

Modulo PLC basado en Arduino™ , con 16 I/Os y comunicaciones I2C, SPI, Modbus y puerto USB.

Figura 30. Controllino MINI Arduino.



Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

Características:

Tabla 11. Especificaciones controllino MINI.

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de alimentación	12 o 24V
Máx corriente de entrada	8A
Salida	6 Relés a 230V/6A
Entradas Análogas/Digitales	8
Salidas digitales	8

Nota: Elaborado por autores

4.7.3 Alternativa 3: SPARTAN PLC Arduino

Figura 31. SPARTAN PLC Arduino.

Nota: Tomado de Didácticas electrónicas

Tabla 12. Especificaciones SPARTAN PLC Arduino.

Basado en el Arduino	Leonardo
Entradas digitales / analógicas	8
Salidas	8 digitales aisladas (5-24VDC), 6 de esas son PWM (5-24VDC) configurables mediante switch, 5 de esas son analógicas 8 bit
Voltaje de alimentación	12-24V

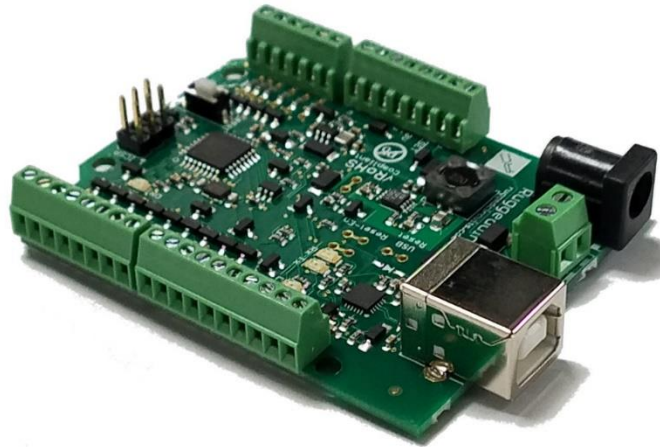
Nota: Elaborado por autores

4.7.4 Alternativa 4: Sistema embebido que cumpla con los requerimientos del sistema

Es posible desarrollar el proyecto utilizando como controlador una tarjeta de desarrollo como por ejemplo Arduino, Beagle y Raspberry. Se determina el tipo de diseño teniendo en cuenta los sensores existentes en el mercado, la instalación, el tipo de entrada y por último el costo

económico; Se selecciona la plataforma de Arduino ruggeduino ya que se tiene conocimientos previos con el manejo de esta plataforma, además de la fácil accesibilidad de sus componentes.

Figura 32. Arduino ruggeduino.



Nota: Tomado de Rugged circuits

Tabla 13. Especificaciones Arduino ruggeduino.

Voltaje de entrada	24 V a 30 V
Microcontrolador	ATmega328P
Pines de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente CC por pin de E/S	300mA

Nota: Elaborado por autores

4.7.5 Comparación de las alternativas entre controladores

Para analizar las diferentes se ayudó con una matriz de pugh la cual es una herramienta de tipo cuantitativo que sirve para la toma de decisiones cuando se tiene varias alternativas.

Para la calificación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

La importancia (Peso) se calificó de 1 a 10 siendo 10 el de mayor peso y 1 el de menor peso, para la calificación de las alternativas se calificó de 1 a 5 siendo de esta manera:

- 1: Nulo de cumplimiento
- 2: Poco Cumplimiento
- 3: Regular cumplimiento
- 4: Mucho cumplimiento
- 5: Excelente Cumplimiento

Para calcular la evaluación ponderada se calcula realizando la multiplicación peso x calificación y luego se suman las evaluaciones ponderadas, siendo así la de mayor puntaje la mejor opción.

Los criterios de selección son los siguientes:

- Costo: El precio del controlador debe estar acorde al presupuesto planteado
- Número y tipo de E/S: Se requiere una entrada analógica (para el sensor de temperatura), dos pines de interrupción (para el encoder) y que utilice la comunicación SPI (comunicación necesaria para implementar potenciómetro digital).
- Lenguaje de programación código abierto: El lenguaje de programación debe ser de código abierto o en tal caso sea de código cerrado que este no sea tan costoso
- Facilidad de adquisición: Disponibilidad del producto en la zona.

Diagrama de Pugh

Tabla 14. Diagrama de Pugh

Criterio de selección	Importancia (peso)	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo acorde al presupuesto	4	2	8	4	16	4	16	5	20
Numero y tipo de E/S acorde a la necesidad	5	4	20	5	25	4	20	5	25
Lenguaje de programación código abierto	3	2	6	5	15	5	15	5	15
Facilidad de adquisición	4	4	16	4	16	5	20	2	8
Totales			50		72		71		68

Nota: Elaborado por autores

Analizando las alternativas, la alternativa con mejor ponderado es la alternativa 2, que es el controlador controlino mini Arduino.

5. Construcción e implementación caja de control

5.1 Adaptación de la caja de control

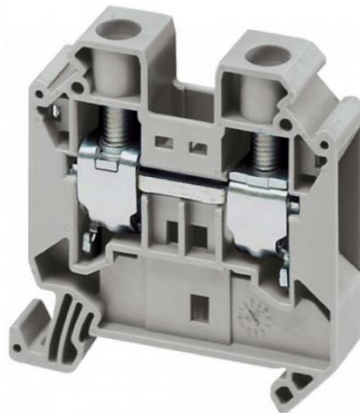
En la construcción de la caja de control es necesario acondicionar la caja con los elementos estructurales-soporte para los dispositivos, así como los elementos de conexión. Es necesario agregar los rieles din ya que aquí se soportarán todos los dispositivos, además son necesarios los borneras las cuales nos permitirán conectar fácilmente cada componente.

Figura 33. Riel Din.



Nota: Tomado de T&S colombia SAS

Figura 34. Bornera riel din.



Nota: Tomado de Corein Group

5.2 Señales visuales y alarma de caja de control

Se debe indicar de manera visual el control o acción que este ejecutando la caja de control; por eso se utilizara pilotos led (azul-verde-amarrillo-rojo). El piloto rojo indicara cualquier modo de falla del proceso, el piloto azul indicara que la acción del PID que está aplicado en el proceso, el piloto amarillo nos indicara la acción de “arranque” el cual lleva el motor a un mínimo de revoluciones necesario para arrancar la combustión en la caldera con ayuda de un operario, por último, el piloto verde indicara que la caja de control esta energizada. Además de estas señales visuales, es necesario una señal auditiva (sirena) que pueda alarmar al operario de cualquier inconveniente en la operación.

Figura 35. Pilotos led.



Nota: Tomado de Electrion

Figura 36. Sirena.

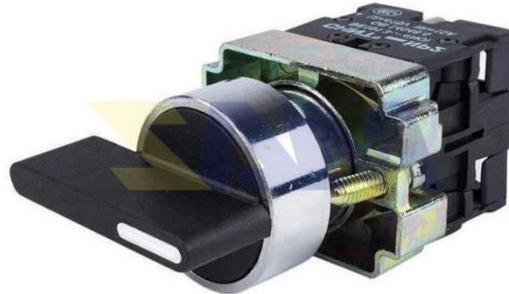
Nota: Tomado de Electrion

La caja de control cuenta también con un botón de emergencia, en caso de falla cualquier persona con o sin conocimiento del sistema pueda accionarlo y detener el proceso. Se implementa un selector de tres posiciones en que se asignara PID, arranque y apagado. En caso del PID, la interfaz para interactuar con el set point será por medio de un potenciómetro que modificará la temperatura a la que se quiere llegar.

Figura 37. Pulsador de seguridad tipo hongo.

Nota: Tomado de Compel S.A

Figura 38. Selector de 3 posiciones.

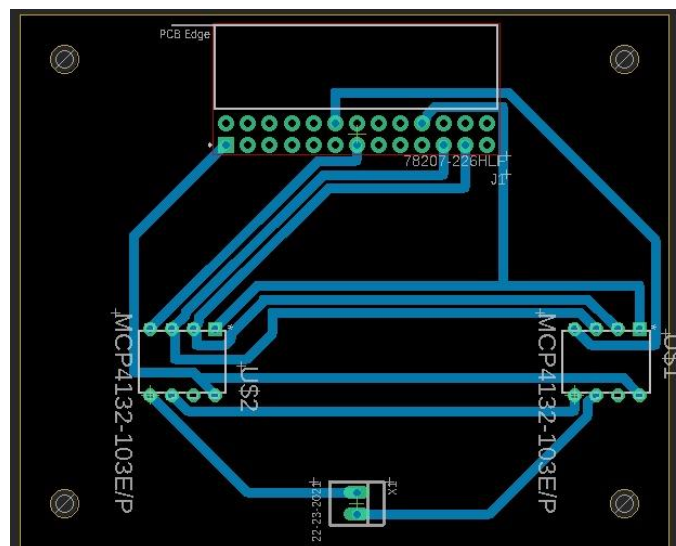


Nota: Tomado de Mazcr

5.3 Diseño PCB

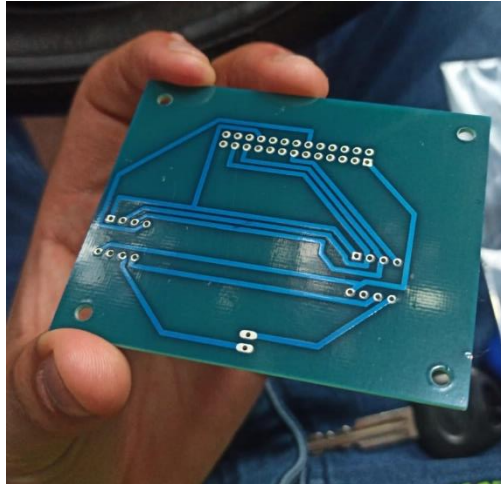
Para incorporar los potenciómetros digitales se realiza por medio de una PCB, donde se diseña el circuito eléctrico en EAGLE, un software de fácil acceso e interfaz sencilla para estas aplicaciones.

Figura 39. Diagrama potenciómetros.



Nota: Elaborado por autores

Figura 40. PCB.



Nota: Tomado por autores

5.4 Ensamble de componentes

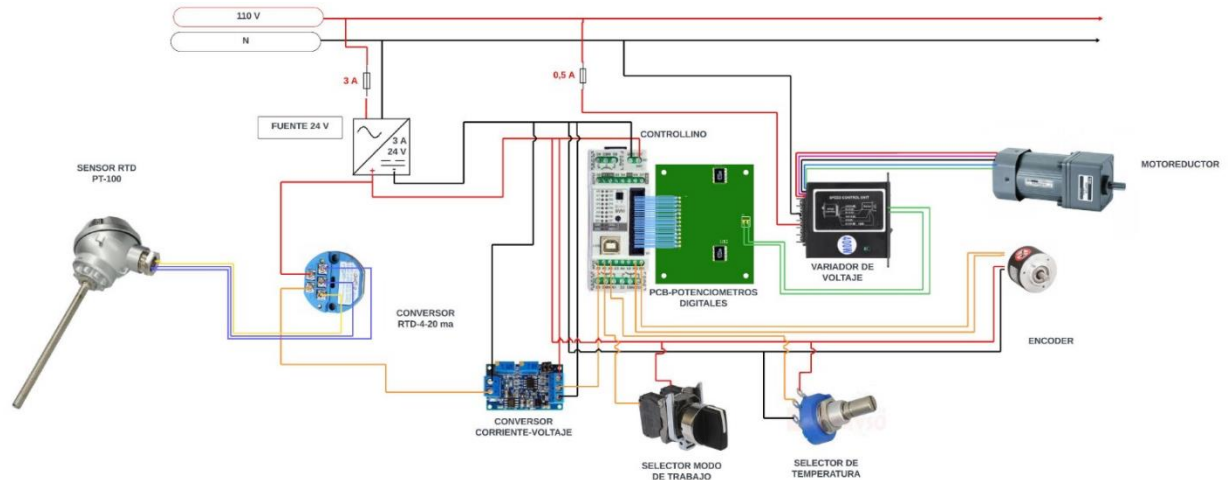
Teniendo como base la caja metálica con los respectivos soportes (riel din) y accesorio para facilitar la conexión (bornera riel din) se realiza el ensamble de cada elemento:

Paso 1: Fijar la fuente que nos permitirá energizar los componentes a 24V

Paso 2: Fijar controllino mini y realizar las respectivas conexiones

Paso 3: Fijar los demás componentes como: la PCB, los módulos del sensor de temperatura, el controlador de velocidad y realizar sus respectivas conexiones.

A continuación, se muestra el esquema de control implementado.

Figura 41. Esquema caja de control.

Nota: Elaborado por autores

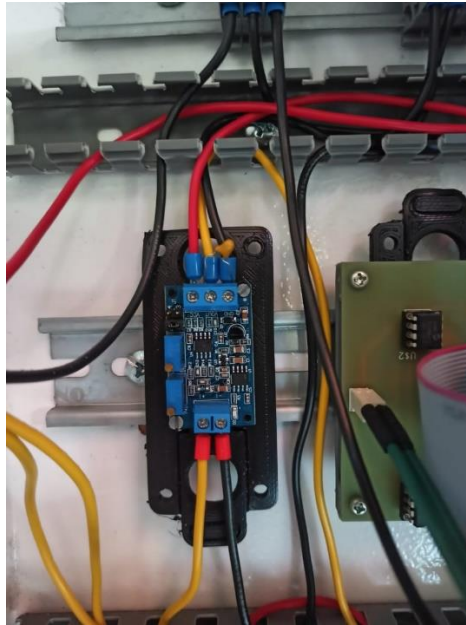
El selector de modo de trabajo permite al operario trabajar en tres modos:

- Arranque: Debido que para encender el quemador se realiza mediante hojas de papel y cartón, el encendido de este es un proceso poco controlado, por ello el modo trabajo arranque pone en marcha el motorreductor a una velocidad fija que permita el encendido.
- Apagado: En donde el motorreductor se encuentra inactivo
- Automático: Una vez el quemador este encendido se selecciona el modo automático y aquí entra en acción el control PID.

Además, se instaló un potenciómetro como selector de temperatura para que el operario pueda elegir la temperatura de set point

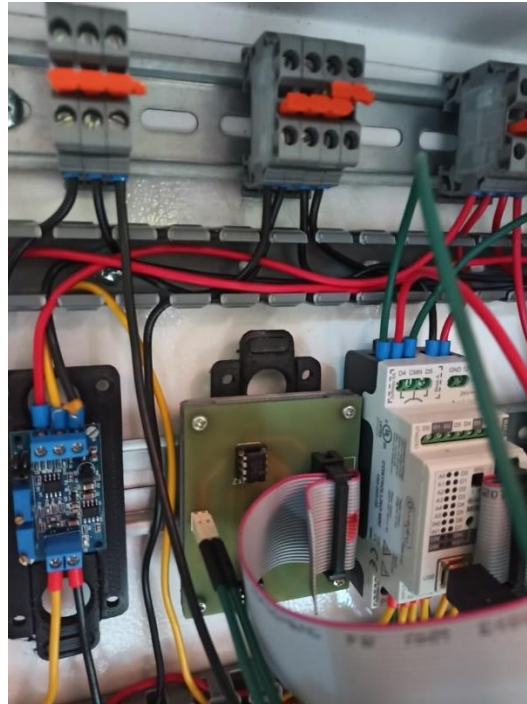
Tanto la PCB como el conversor de corriente a voltaje fue requerido diseñar un soporte para riel din y poder anclarlos a la caja. La comunicación de la PCB al controlador se hace mediante un cable ribbon de 26 pines.

Figura 42. Conexión conversor corriente-voltaje.



Nota: Elaborado por autores

Figura 43. Conexión PCB, Controllino.



Nota: Elaborado por autores

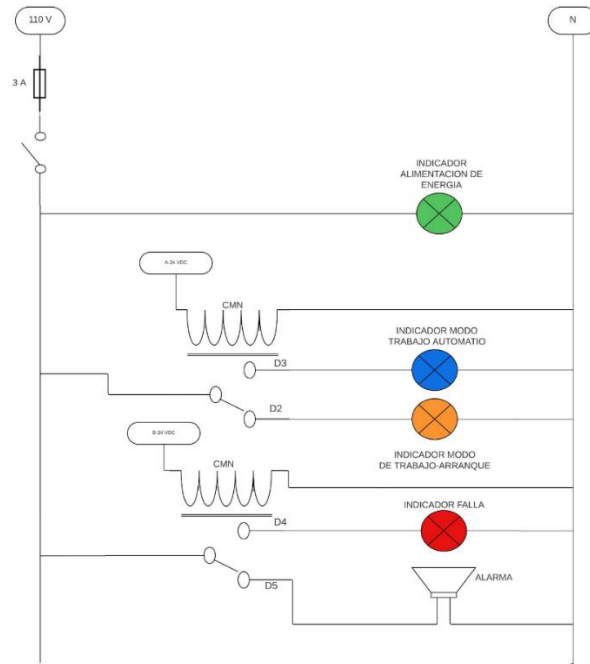
Figura 44. Conexión caja de control



Nota: Elaborado por autores

A continuación, se muestra el esquema del circuito de los relés del controlador, cabe destacar que la activación de cada relé depende la señal propia del controlador.

Figura 45. Circuito relés controlador



Nota: Elaborado por autores

5.5 Montaje en planta

5.5.1 Instalación sensor Pt100

Para instalación del sensor PT100 se utilizó un racor NPT de 1/2" el cual fue instalado a la salida del ventilador centrífugo y antes de la cámara de secado.

Figura 46. Instalación Racor NPT ½”.



Nota: Tomado por autores

Una vez soldado el racor se procedió a realizar pruebas de fugas, esta prueba se realizó encendiendo el ventilador y mediante mezcla de agua y jabón se vertía en la soldadura para encontrar posibles fugas de aire. Una vez realizado las pruebas se procedió a aplicar sellante sobre la soldadura y la instalación del sensor.

Figura 47. Instalación Sensor Pt 100.



Nota: Tomado por autores

5.5.2 Instalación encoder

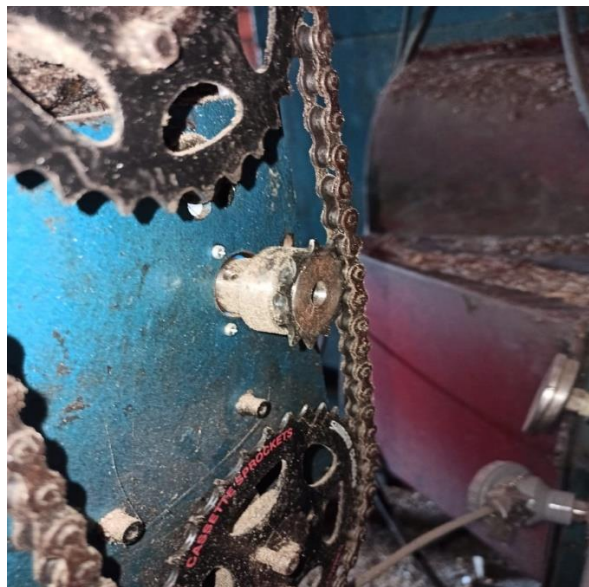
El encoder fue instalado sobre la placa que sostiene el motorreductor, el cual lee la velocidad tangencial de la cadena, para ello se diseñó un piñón que se acoplara a la cadena.

Figura 48. Instalación Encoder.



Nota: Tomado por autores

Figura 49. Piñón Encoder.



Nota: Tomado por autores

El encoder tiene una resolución de 600 pulsos con tres canales de lectura, para poder leer las revoluciones se tiene la siguiente ecuación:

$$REV = Contador * \left(\frac{60}{2400} * 0,5 \right) \quad (27)$$

Donde,

$$REV = [RPM]$$

Contador = Pulsos que cuenta el controllino

2400 = Resolución del encoder teniendo en cuenta que se utilizan dos canales de lectura

5.5.3 Instalación caja de control

La caja de control fue instalada sobre soportes escuadra anclados a la pared, esto con el fin de mantener ubicada la caja en un lugar que no ocupara espacio necesario.

Figura 50. Caja de control Instalada.



Nota: Tomado por autores

Para la conexión entre la caja de control y los demás componentes se usaron conectores impermeables, esto con el fin de ser sencillo conectar y desconectar los demás componentes.

Figura 51. Conectores Impermeables.



Nota: Tomado por autores

6. Modelado matemático y simulación del proceso de variación de temperatura por medio de la función de transferencia

El subsistema encargado del suministro de biomasa a la caldera comprende de una tolva de almacenamiento conectado directamente al tornillo sin fin para ser transportado a la cámara de combustión permitido por el movimiento del tornillo impulsado por un motorreductor controlado por un variador de voltaje monofásico. Aquí es importante conocer las variables de entrada y salida del subsistema donde se controlará la acción del variador de voltaje el cual se maneja por un potenciómetro, dando así la señal de entrada; el flujo másico de cisco dado será la señal de salida proporcionada por el subsistema.

6.1 Ecuaciones de gobierno del sistema

6.1.1 Modelado de la cámara de combustión

Por medio de la composición química de la biomasa, el flujo masico del aire de combustión y el flujo masico de biomasa es posible hallar la temperatura adiabática de la llama “ T_{h1} ” representado en el siguiente modelo de la cámara de combustión:

En la teoría es posible encontrar diferentes ecuaciones de ingeniería que permiten de manera sencilla modelar el comportamiento basándose en los balances masicos y termodinámicos.

- **Flujos y composiciones**

Los gases de combustión están dados a partir del elemento del combustible, la cantidad de aire presente en la combustión y si la combustión es completa o incompleta. En la combustión completa tenemos presente: CO_2 , H_2O , SO_2 y O_2 , en la biomasa encontramos

principalmente cinco elementos: C , H , S , N y O . El O contribuye a la oxidación de los otros cuatro elementos, lo cual reduce la cantidad de aire requerido.

- **El O_2 requerido**

$$\bar{m}_{O_2,air} = \left(X_C \cdot \frac{M_{O_2}}{M_C} + \frac{X_C}{4} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_H} + X_S \cdot \frac{M_{O_2}}{M_S} - X_O \right) (1 - X_{H_2O}) \cdot \lambda \left[\frac{Kg O_2}{Kg cisco} \right] \quad (28)$$

Donde,

$$M_i = \text{Masa molecular del elemento } i \left[\frac{Kg}{K_{mole}} \right] \quad (29)$$

$$M_C = 12.0115, M_H = 1.00797, M_S = 32.064, M_{O_2} = 31.9988$$

$$X_i = \text{Fracción másica del elemento } i \text{ libre de ceniza (daf)}$$

$$X_{H_2O} = \text{Fracción de } H_2O \text{ libre de ceniza mojada (waf)}$$

$$\lambda = \text{Cantidad de aire excedido}$$

- **N_2 del aire**

$$\bar{m}_{N_2,air} = \bar{m}_{O_2,air} \cdot \frac{Y_{N_2,air}}{Y_{O_2,air}} \cdot \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}} \left[\frac{Kg N_2}{Kg cisco} \right] \quad (30)$$

Donde,

$$Y_{O_2,air} = \text{Fracción de } O_2 \text{ en el aire (usualmente 0.21)}$$

$$Y_{N_2,air} = 1 - Y_{O_2,air}$$

$$M_{N_2} = 28.0134$$

- **Aire**

$$\bar{m}_{air} = \bar{m}_{O_2,air} + \bar{m}_{N_2,air} \left[\frac{Kg\ air}{Kg\ cisco} \right] \quad (31)$$

- **Gases de combustión**

$$\bar{m}_{fg} = \bar{m}_{air} + 1 \left[\frac{Kg\ gases}{Kg\ cisco} \right] \quad (32)$$

- **Masas de las especies de gases**

$$\bar{m}_{CO_2} = X_C \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C} \cdot (1 - X_{H_2O}) \left[\frac{Kg\ CO_2}{Kg\ cisco} \right] \quad (33)$$

$$\bar{m}_{H_2O} = X_H \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} \cdot (1 - X_{H_2O}) + X_{H_2O} \left[\frac{Kg\ H_2O}{Kg\ cisco} \right] \quad (34)$$

$$\bar{m}_{SO_2} = X_S \cdot \frac{M_{SO_2}}{M_S} \cdot (1 - X_{H_2O}) \left[\frac{Kg\ SO_2}{Kg\ cisco} \right] \quad (35)$$

$$\bar{m}_{N_2} = \bar{m}_{N_2,air} + X_N \cdot (1 - X_{H_2O}) \left[\frac{Kg\ N_2}{Kg\ cisco} \right] \quad (36)$$

$$\bar{m}_{O_2} = \frac{\bar{m}_{O_2,air}}{\lambda} \cdot (\lambda - 1) \left[\frac{Kg\ O_2}{Kg\ cisco} \right] \quad (37)$$

Donde,

$$M_{CO_2} = 44.00995, M_{H_2O} = 18.01534, M_{H_2} = 2.01594, M_{SO_2} = 64.0628$$

- **Fracciones másicas de las especies de gases**

$$X_i = \frac{\bar{m}_i}{\sum_i \bar{m}_i} \left[\frac{Kg\ i}{Kg\ cisco} \right] \quad (38)$$

- **Fracciones de volumen de los gases**

$$Y_i = \frac{\frac{X_i}{M_i}}{\sum_i \frac{X_i}{M_i}} \quad (39)$$

$$\sum_i \frac{X_i}{M_i} = \frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}} \quad (40)$$

- **Masa molecular de los gases**

$$M_{FG} = \sum_i Y_i M_i = Y_{CO_2} M_{CO_2} + Y_{H_2O} M_{H_2O} + Y_{SO_2} M_{SO_2} + Y_{N_2} M_{N_2} + Y_{O_2} M_{O_2} \quad (41)$$

- **Densidad de los gases**

$$\rho_{FG} = \frac{P_0}{\frac{R_u}{M_{FG}} \cdot T_0} \quad (42)$$

Donde,

$P_0 =$ Presión a condiciones normales = 101325 [Pa]

$T_0 =$ Temperatura a condiciones normales = 273.15 [K]

$R_u =$ Constante universal de los gases = 8314.32 $\left[\frac{J}{K_{mole}K} \right]$

- **Densidad del aire**

$$\rho_{air} = \frac{P_0}{\frac{R_u}{M_{air}} \cdot T_0} \quad (43)$$

$$M_{air} = \text{Masa molecular del aire} = Y_{O_2,air}M_{O_2} + Y_{N,air}M_{N_2} \left[\frac{Kg}{K_{mole}} \right]$$

- **Flujo másico de los gases**

$$\dot{m}_{FG} = \dot{m}_f \cdot \bar{m}_{FG} \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (44)$$

Donde,

$\dot{m}_f = \text{Flujo masico de combustible}$

- **Volumen de los gases**

$$\bar{V}_{FG} = \frac{\bar{m}_{FG}}{\rho_{FG}} \left[\frac{Nm^3}{kg \text{ cisco}} \right] \quad (45)$$

- **Flujo volumétrico de los gases**

$$\dot{V}_{FG} = \frac{\dot{m}_{FG}}{\rho_{FG}} * \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \quad (46)$$

- **Flujo másico del aire**

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_f * \bar{m}_{air} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (47)$$

- **Flujo volumétrico del aire**

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air}} \quad (48)$$

- **Poder calorífico superior e inferior**

Una posible forma de hallar el poder calorífico es por medio de las ecuaciones dadas por Van Loo y Koppejan:

$$HHV_{Hanbook} = 0.3491 * X_C + 1.1783 * X_H + 0.1005 * X_S - 0.0151X_N - 0,1034X_O - 0.0211 * X_{ash} \left[\frac{MJ}{Kg} \right] \quad (49)$$

El poder calorífico inferior está en función del poder calorífico superior:

$$LHV_i = HHV_i \left(1 - \frac{w}{100} \right) - 2.444 * \frac{w}{100} - 2.444 * \frac{X_H}{100} * 8.936 \left(1 - \frac{w}{100} \right) \left[\frac{MJ}{Kg} \right] \quad (50)$$

Donde,

$2.444 =$ Diferencia de entalpias entre el estado liquido y gaseoso del agua a $25^\circ C$

$8.936 = H_{H_2O}/M_{H_2}$

$w =$ Contenido de humedad del combustible en %

$h =$ Concentracion de hidrogeno en %

- **Temperatura de ablandamiento**

Según (Morales, 2009) presenta una eación para realizar aproximaciones de la temperatura de ablandamiento:

$$TA = 1.81 * X_{CAO} + 4.20 * X_{Al_2O_3} - 2.41 * X_{K_2O} + 5.31 * X_{P_2O_5} + 1017 [^\circ C] \quad (51)$$

- **Temperatura adiabática de la llama**

$$T_{adiabatca\ llama} = T_a + \frac{LHV}{\bar{m}_{FG} C_{PG}} \quad (52)$$

Donde,

$$T_a = \text{Temperatura del aire de entrada [K]}$$

$$C_{PG} = \text{Poder calorífico a presión constante de los gases, asumido igual al del aire a 300 K [l /Kg K]}$$

$$m_{FG} = \text{Relación masica de gases y combustible} \left[\frac{\text{Kg gases}}{\text{Kg combustible}} \right] \quad (53)$$

- **Tiempo de residencia**

El tiempo presentado por Toscano [23] es un tiempo de estancamiento necesario para que se lleve a cabo la combustión completa entre la mezcla de aire y combustible.

$$tr = \frac{V_c}{\dot{V}_{FG}} = \frac{V_c}{\dot{m}_f * \bar{m}_{FG}} * 3600[\text{seg}] \quad (54)$$

Donde,

$$V_c = \text{Volumen de la cámara de combustión [m}^3\text{]}$$

- **Ecuación resultante**

Remplazando la ecuación se obtiene:

$$T_{\text{adiabática llama}} = T_a + \frac{LHV * t_r * \dot{m}_f}{V_c * \rho_{FG} * C_{PG}} \quad (55)$$

Como se puede observar de este análisis se obtuvo la ecuación resultante de temperatura de llama adiabática, a partir de la literatura, el siguiente paso sería hallar la composición química del cisco, pero en lo que se pudo observar en campo hay muchas variedades de cisco que se utilizan para la quema.

Figura 52. Caracterización tipos de biomasa.



Nota: Tomado de autores

Como se puede observar en la figura estos son unos de los 5 tipos de cisco que se utilizan en la planta térmica, en todos ellos varían la granulometría de la cascarilla, humedad y del tipo de variedad de café del cual fue trillado, por ende, realizar el modelado de combustión con el fin de determinar los parámetros del controlador se vuelve no funcional. Por ello este caso se recurre a realizar un modelo de caja negra para encontrar los parámetros del controlador.

6.2 Modelo de la ecuación de transferencia por método caja negra

Para el modelado de la función de transferencia se realizarán tres métodos de caja negra, uno el método de Smith, Van Der Grinten y el método de Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin), y luego se determina cual es el método que más se aproxima al modelo de la planta para ser implementado.

Figura 53. Caja Negra.

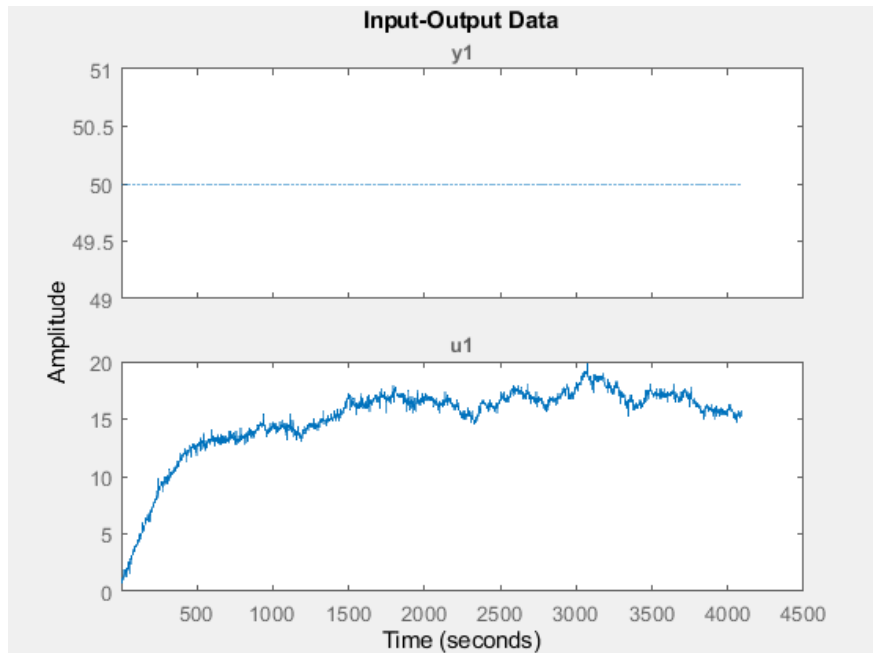
Nota: Elaborado por autores

Para la realización de estos tres métodos de caja negra se realizó la toma de datos en la planta.

Figura 54. Toma de datos para el modelado de la función de transferencia.

Nota: Tomado por autores

Para tener el comportamiento de la planta se grafica el comportamiento de la temperatura vs tiempo, así como el escalón aplicado, para este caso se aplicó un escalón de 50%.

Figura 55. Escalón vs tiempo y Grafica temperatura vs tiempo.

Nota: Tomado de autores

Como se puede observar nuestro sistema tiene un comportamiento de un sistema sobreamortiguado ya que los sistemas térmicos en lazo abierto tienen este comportamiento. Una vez obtenido los datos se realiza la estimación de la función de transferencia por los tres métodos mencionados.

6.2.1 Método Eye Ball-Método Van Der Grinten

Como el sistema tiene la característica de ser un sistema sobreamortiguado se aplica el método Eye Ball-Metodo de Van Der Grinten donde busca encontrar una aproximación a partir de una función de transferencia de segundo orden de la planta, la función de transferencia que se espera obtener es la siguiente:

$$G(S) = K \frac{e^{-\tau_d S}}{(\tau_1 S + 1) * (\tau_2 S + 1)} \quad (56)$$

Donde,

$$K = \frac{\text{Valor Estado Estable Salida}}{\text{Valor Estado Estable Entrada}} \quad (57)$$

$$\tau_1 = \tau \frac{3ae - 1}{1 + ae} \quad (58)$$

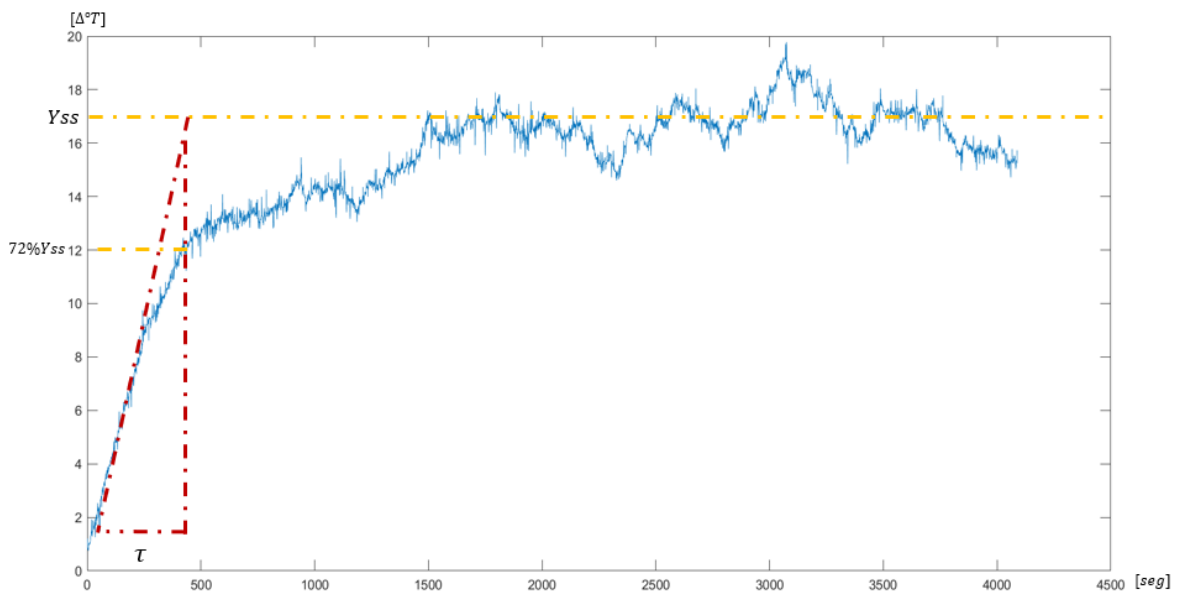
$$\tau_2 = \tau \frac{1 - ae}{1 + ae} \quad (59)$$

$$\frac{1}{3e} < a < \frac{1}{e} \quad (60)$$

$$\tau_d = \text{Tiempo retardo} \quad (61)$$

A partir de la gráfica de lazo abierto tomada en la planta se determinan las variables del modelo:

Figura 56. Gráfica método Van Der Grinten



Nota: Tomado de autores

Se obtienen los siguientes parámetros:

Tabla 15. Parámetros Método Van Der Grinten

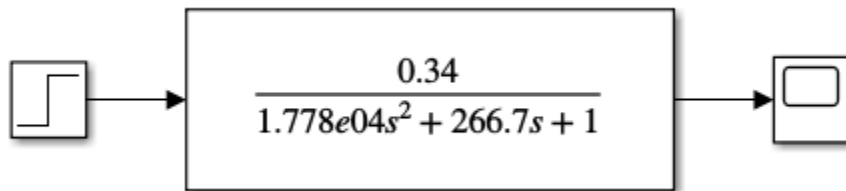
a	0.1839
τ	400
Yss (temperatura de establecimiento)	17 [°T]
63.2% Yss	10 [°T]
τ_1	133.33
τ_2	133.33

Nota: Tomado de autores

Obtenemos la siguiente ecuación de transferencia

$$G(s) = \frac{0.34}{1.778e04s^2 + 266.7s + 1} \quad (62)$$

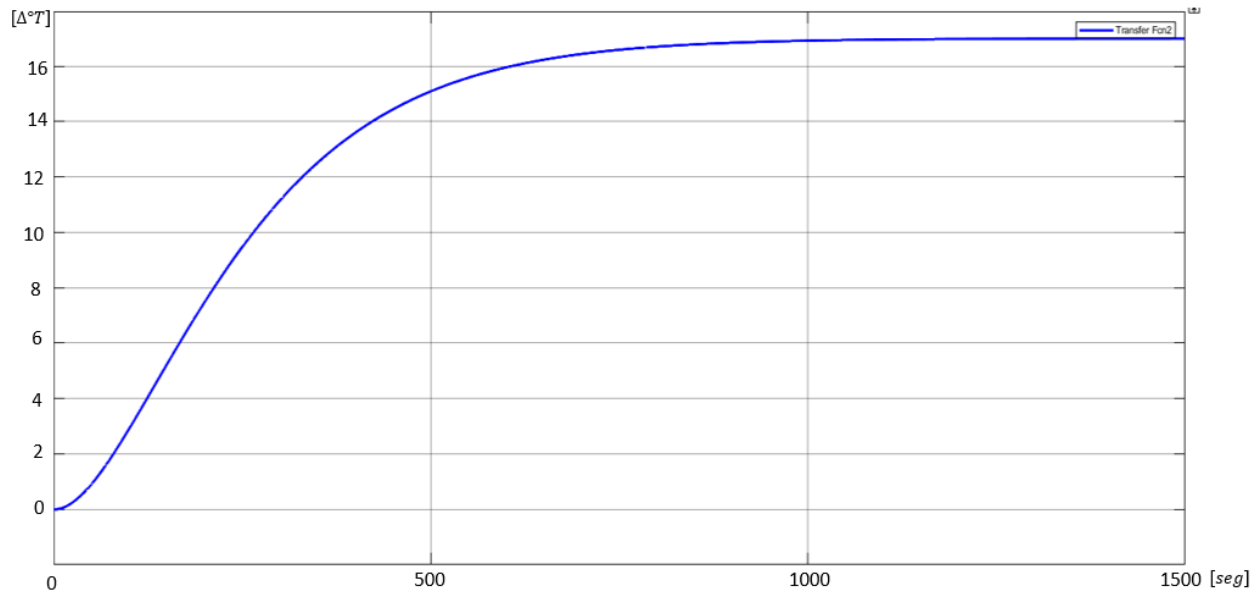
Figura 57. Diagrama de Bloques método Van Der Grinten.



Nota: Tomado de autores

Graficando de obtiene:

Figura 58. Simulación método de Van Der Grinten.



Nota: Tomado de autores

6.2.2 Metodo Eye Ball-Metodo Smith

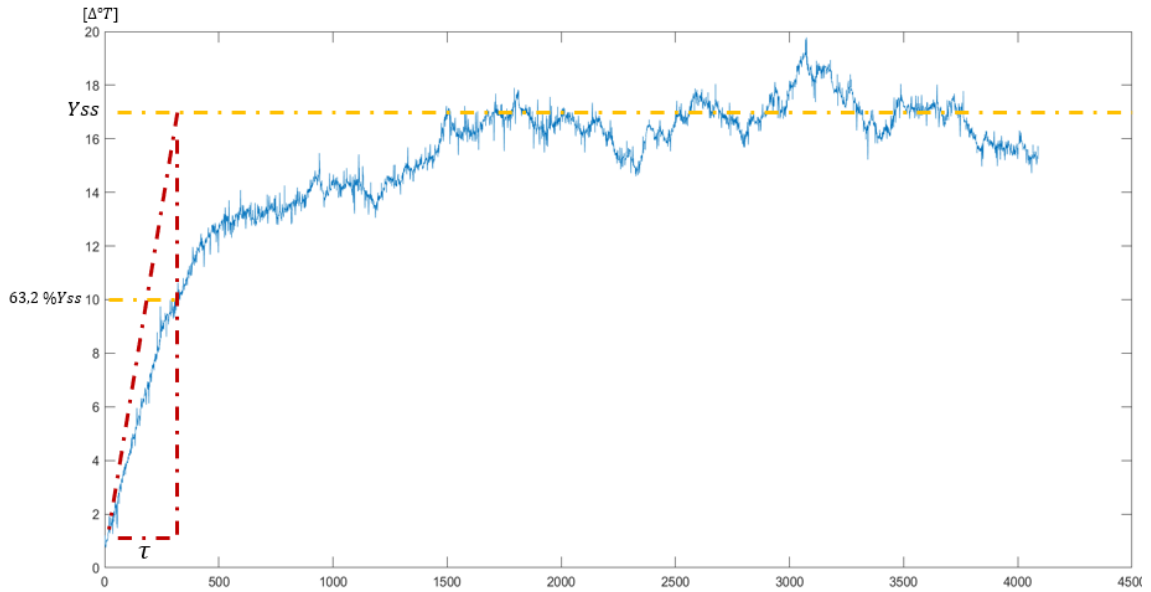
Como ya se mencionó el sistema es sobreamortiguado por lo cual se aplica el método Eye Ball-Metodo Smith donde busca encontrar una aproximación a partir de una función de transferencia de primer orden de la planta, la función de transferencia que se espera obtener es la siguiente:

$$G(S) = K \frac{e^{-\tau_d S}}{(\tau S + 1)} \quad (63)$$

$$K = \frac{\text{valor estado estable salida}}{\text{valor estado estable entrada}} \quad (64)$$

A partir de la gráfica de lazo abierto tomada en la planta se determinan las variables del modelo:

Figura 59. Gráfica método Smith.



Nota: Tomado de autores

Tabla 16. Parámetros método Smith.

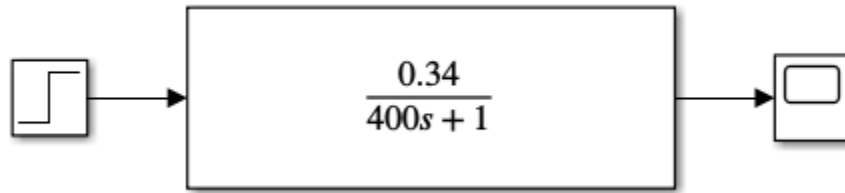
τ_d	Ya que el modelo no tiene retardo se toma el valor de cero.
τ	400 [seg]
Yss (tiempo de establecimiento)	17 [°T]
63.2 Yss	10 [°T]

Nota: Tomado de autores

Obtenemos la siguiente ecuación de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.34}{450s + 1} \quad (65)$$

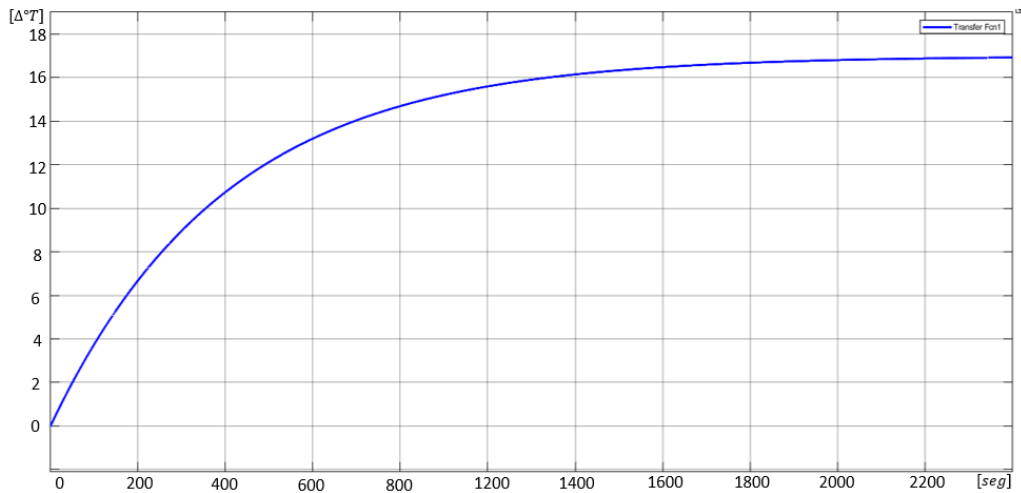
Figura 60. Diagrama de bloques método Smith.



Nota: Tomado de autores

Graficando

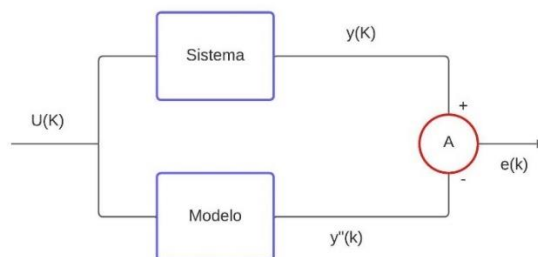
Figura 61. Simulación modelo método de Smith.



Nota: Tomado de autores

6.2.3 Método Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin)

Figura 62. Método Isqnonlin



Nota: Tomado de autores

Este método consiste en comparar las señales de salida del sistema real con el modelo matemático que se plantea a continuación:

$$G(s) = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (66)$$

Se planteo este modelo matemático de segundo orden, es decir con dos polos y un cero ya que es un sistema térmico sobreamortiguado.

En este caso por consideraciones del sistema se tomó un cero, es decir, nos daría un sistema de orden superior, como se muestra:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{(s + P_1)(s + P_2) \cdots (s + P_n)} \quad (67)$$

Para determinar estas constantes se asume un modelo general donde la salida modelada va a depender de los valores anteriores de la salida y de las entradas actuales y anteriores del sistema por lo cual el sistema tiene memoria, es decir el sistema depende de los “q” valores anteriores y de (p+1) valores de entrada.

$$y''(k,\theta) = a_1 y''(k-1) - a_2 y''(k-2) + \dots + a_q y''(k - q) \quad (68)$$

$$+ b_0 u(k) + b_1 u(k - 1) + \dots + b_p u(k - p)$$

Donde se define el siguiente vector:

$$\theta = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_q \quad b_0 \quad \dots \quad b_p]^T \quad (69)$$

Ahora para encontrar el vector de parámetros ϑ se define un problema de optimización y se define la función de costo:

$$J(\theta) = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^N (e(k))^2 = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^N (y(k) - y''(k))^2 = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^N (y(k) - y''(k, \theta))^2 \quad (70)$$

Esta última es una función escalar de varias variables de θ la cual tiene que minimizarse, para minimizar una función de varias variables se necesita encontrar el gradiente de esa función y igualarla a cero.

$$\nabla_{\theta} J(\theta) = 0 \quad (71)$$

Para ello se escribe la salida del modelo como un vector como una multiplicación de dos vectores, y en base a la ecuación 15 se obtiene:

$$y(k, \theta) = \varphi^T(k) * \theta \quad (72)$$

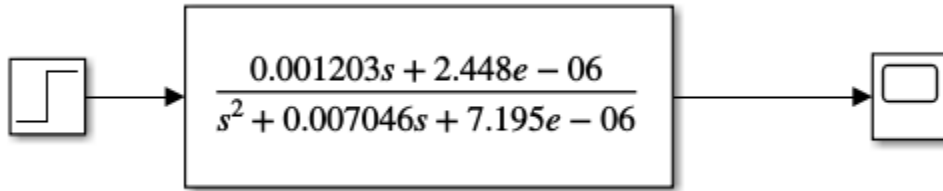
Y aplicando los mismos procedimientos desde la ecuación 16 hasta la 25 se obtiene el valor de θ , que es el óptimo para nuestro modelo planteado. Este modelo matemático fue validado con ayuda del software realiza el software de Matlab para la estimación de esta función.

A continuación, la ecuación de transferencia resultante:

$$G(S) = \frac{0.001203 S + 2.44e - 06}{S^2 + 0.007046 S + 7.195e - 06} \quad (73)$$

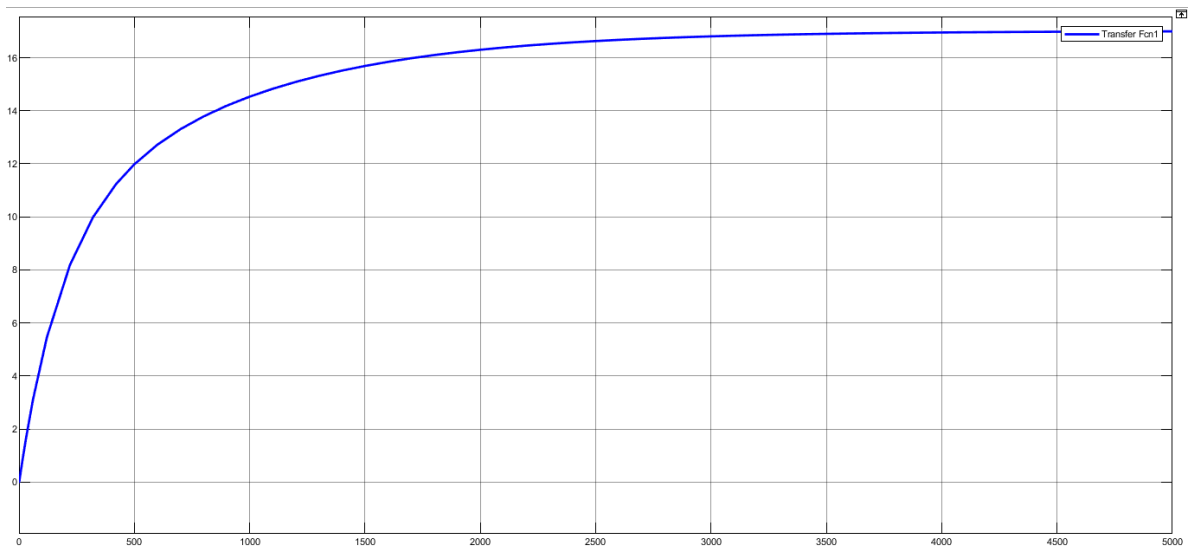
En Simulink se grafica en la función de transferencia en respuesta de un escalón, se utiliza el siguiente diagrama de bloques para obtener la gráfica:

Figura 63. Diagrama de bloques para graficar función de transferencia.



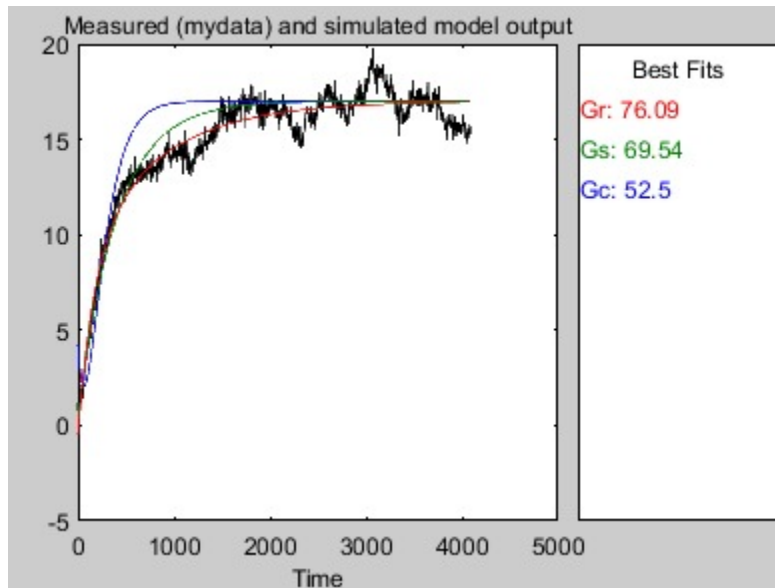
Nota: Tomado de autores

Figura 64. Gráfica función de transferencia en respuesta de escalón.



Nota: Tomado de autores

Por de Matlab se genera la gráfica del comportamiento del sistema comparando las tres ecuaciones de transferencia conjunto a la toma de datos el cual se muestra a continuación:

Figura 65. Gráfica comparación funciones de transferencia.

Nota: Tomado de autores

Se determina los Best fits de cada función donde,

Gr = función de transferencia por método Isqnonlin

Gs = función de transferencia por método Smith

Gc = función de transferencia por método Van Der Grinten

7. Sintonización y validación

7.1 Sintonización

Para la sintonización se utiliza el método del lugar geométrico de las raíces, donde se determinará los parámetros de diseño y se determina la mejor ubicación de los polos en cada ecuación de transferencia. En este caso los parámetros de diseño serán los siguientes:

Tabla 17. Parámetro de diseño aplicado en la sintonización.

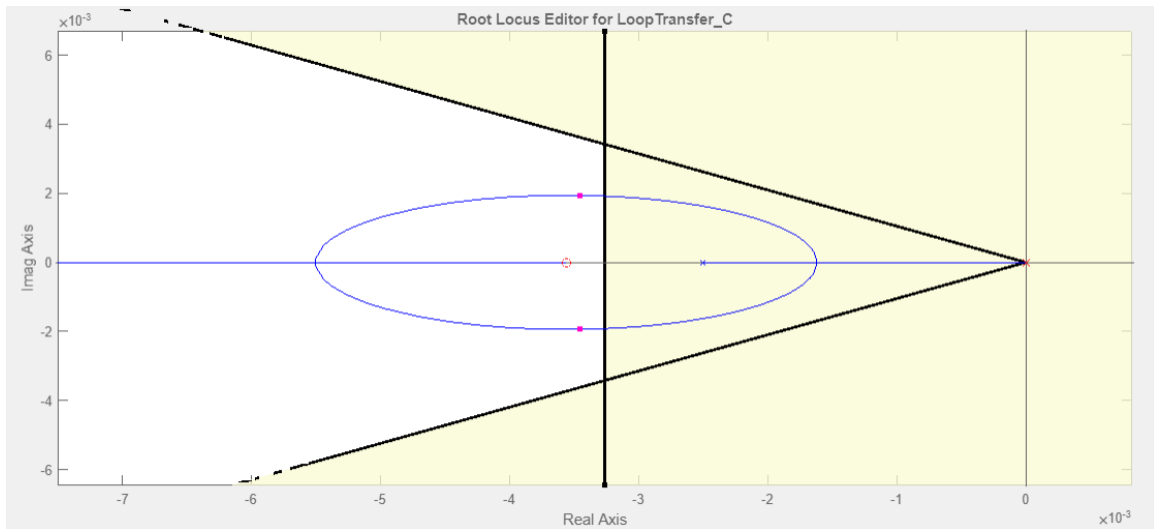
Tiempo de establecimiento	1200 [seg]
Overshoot	Para este parámetro se establece que debe ser menos al 5%

Nota: Tomado de autores

7.2 Sintonización ecuación de transferencia Método Eye Ball-Método Smith

Para esta ecuación de transferencia la cual es de primer orden donde solo encontramos un polo, por consiguiente, es fácil encontrar la mejor aproximación, de esta manera se utiliza la herramienta de Matlab para encontrar las constantes.

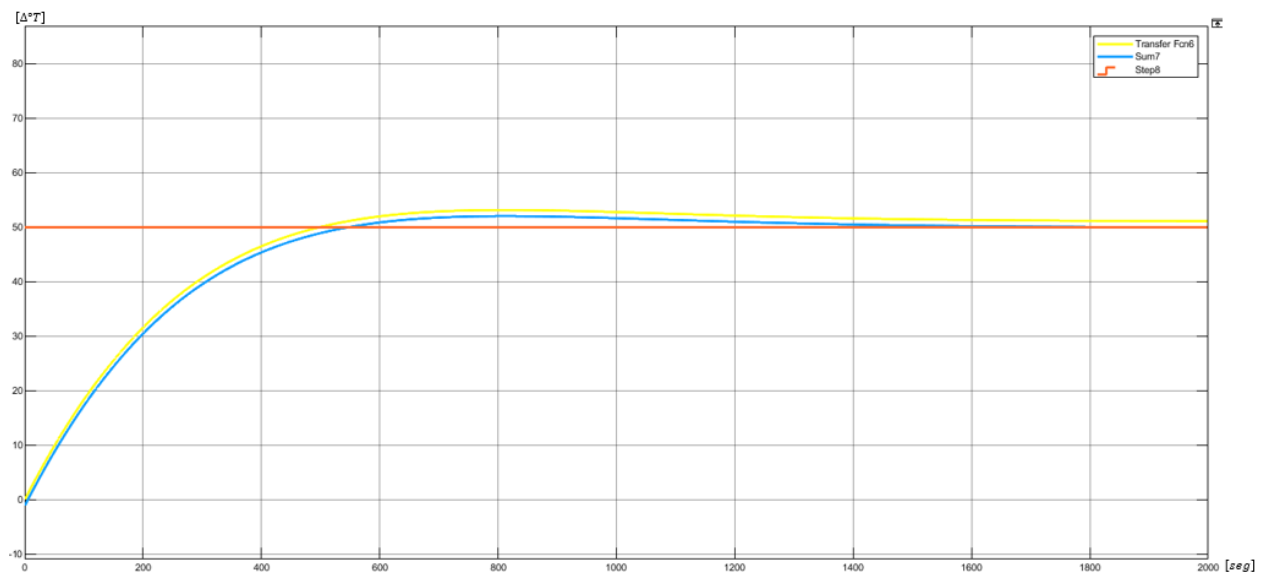
Figura 66. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Smith.



Nota: Tomado de autores

Se realiza la ubicación de los polos lo más próximo a los rangos establecidos previamente, a continuación, se presenta la gráfica de sintonización:

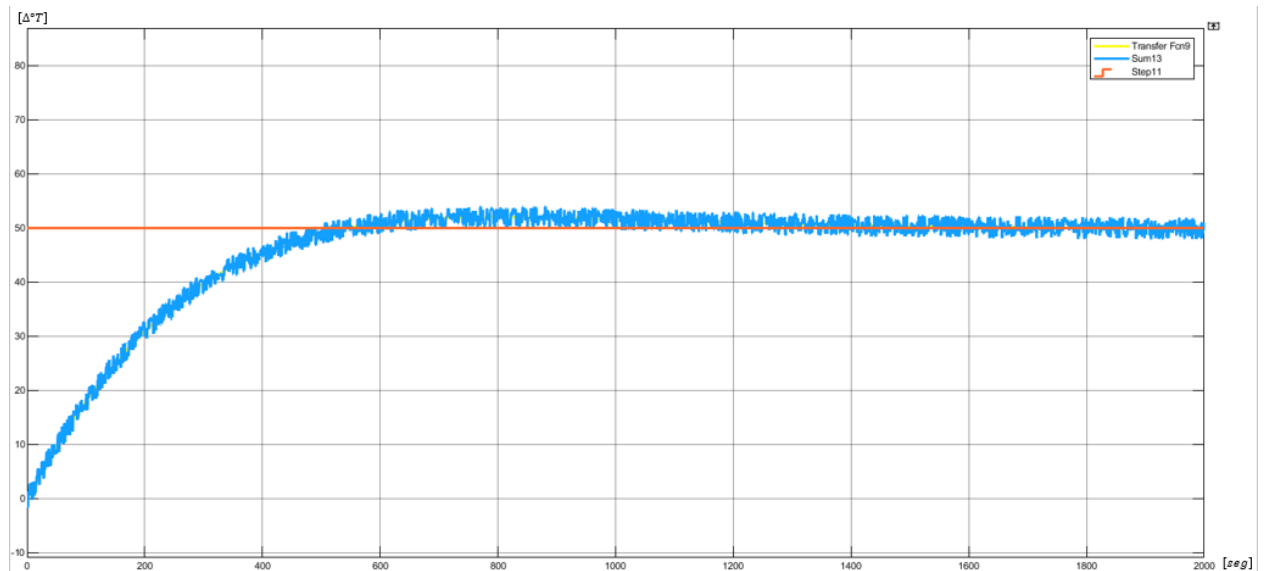
Figura 67. Sintonización función de transferencia método Smith.



Nota: Tomado de autores

Al considerar el ruido presente en la toma de datos de lazo abierto se introduce en el diagrama de bloques una perturbación para hacer la gráfica más aproximable a la obtenida.

Figura 68. Función de transferencia método Smith con perturbación.

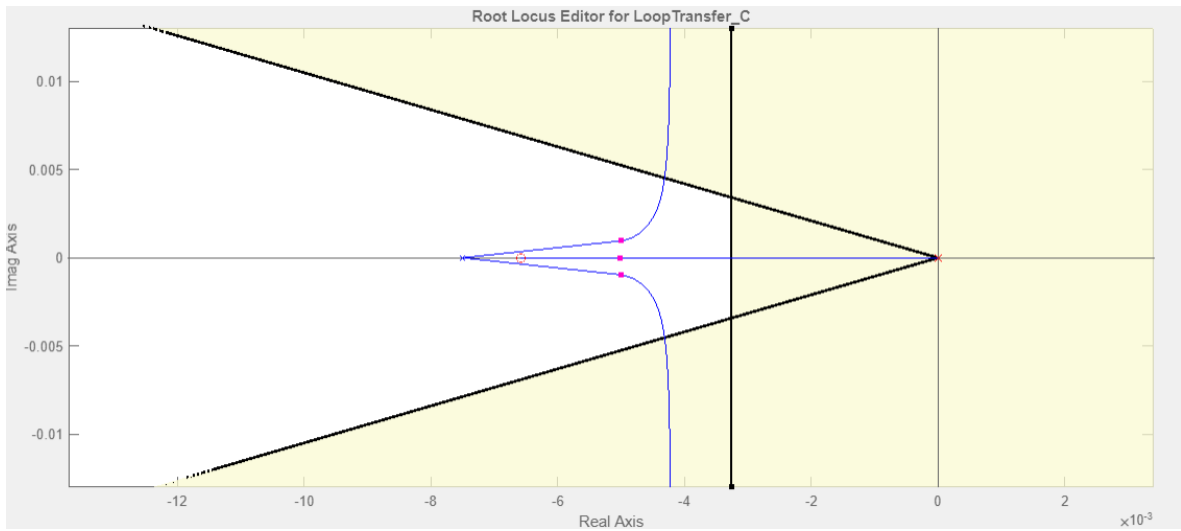


Nota: Tomado de autores

7.3 Sintonización ecuación de transferencia Método Eye Ball-Método Van Der Grinten

Para esta ecuación de transferencia la cual es de segundo orden donde se encuentran dos polos, para esto se utiliza la herramienta de Matlab para encontrar las constantes.

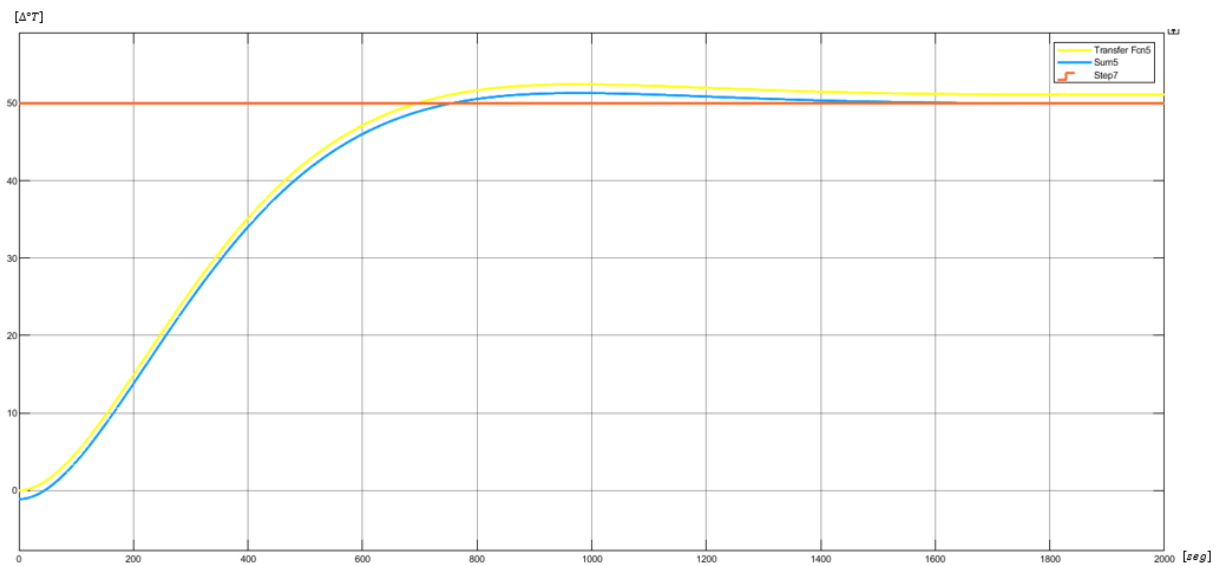
Figura 69. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Van Der Grinten.



Nota: Tomado de autores

Se realiza la ubicación de los polos lo más próximo a los rangos establecidos previamente, a continuación, se presenta la gráfica de sintonización:

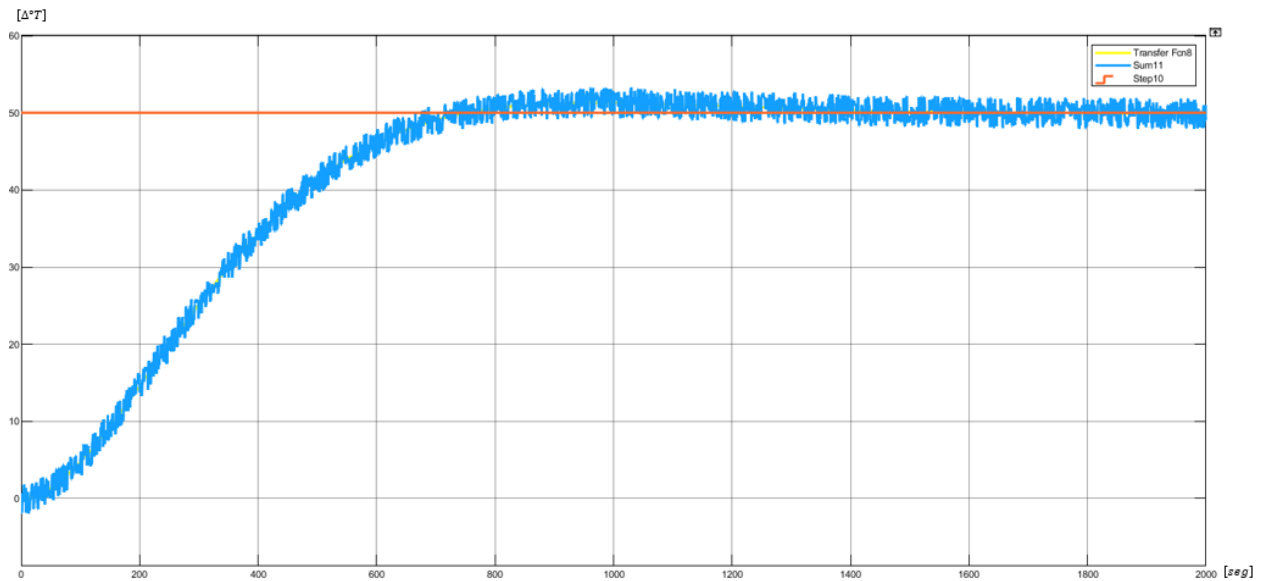
Figura 70. Sintonización función de transferencia método Van Der Grinten.



Nota: Tomado de autores

Al considerar el ruido presente en la toma de datos de lazo abierto se introduce en el diagrama de bloques una perturbación para hacer la gráfica más aproximable a la obtenida.

Figura 71. Sintonización función de transferencia método Van Der Grinten con perturbación.

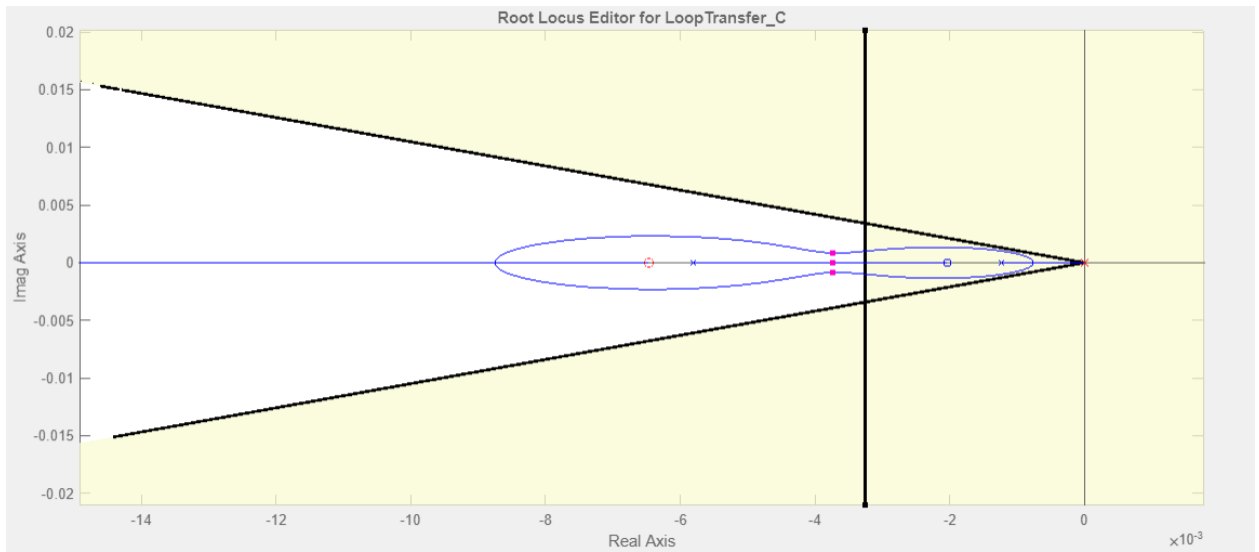


Nota: Tomado de autores

7.4 Sintonización ecuación de transferencia Método Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin)

Para esta ecuación de transferencia la cual es de orden superior donde se encuentran dos polos y un cero, para esto se utiliza la herramienta de Matlab para encontrar las constantes.

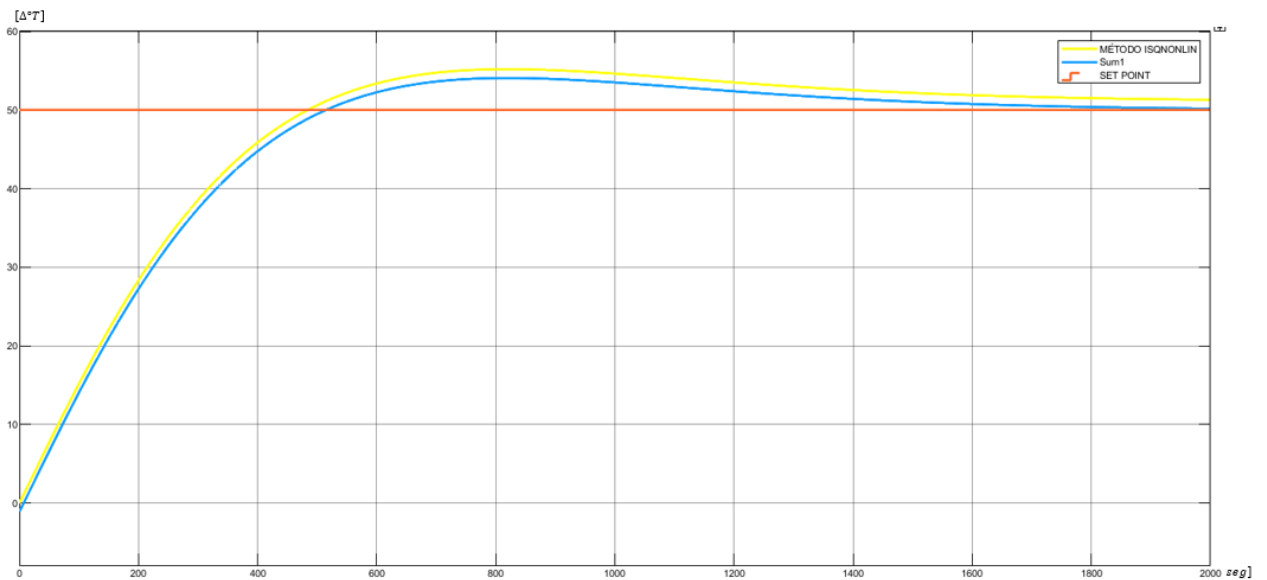
Figura 72. Lugar geométrico de las raíces para función de transferencia método Isqnonlin.



Nota: Tomado de autores

Se realiza la ubicación de los polos lo más próximo a los rangos establecidos previamente, a continuación, se presenta la gráfica de sintonización:

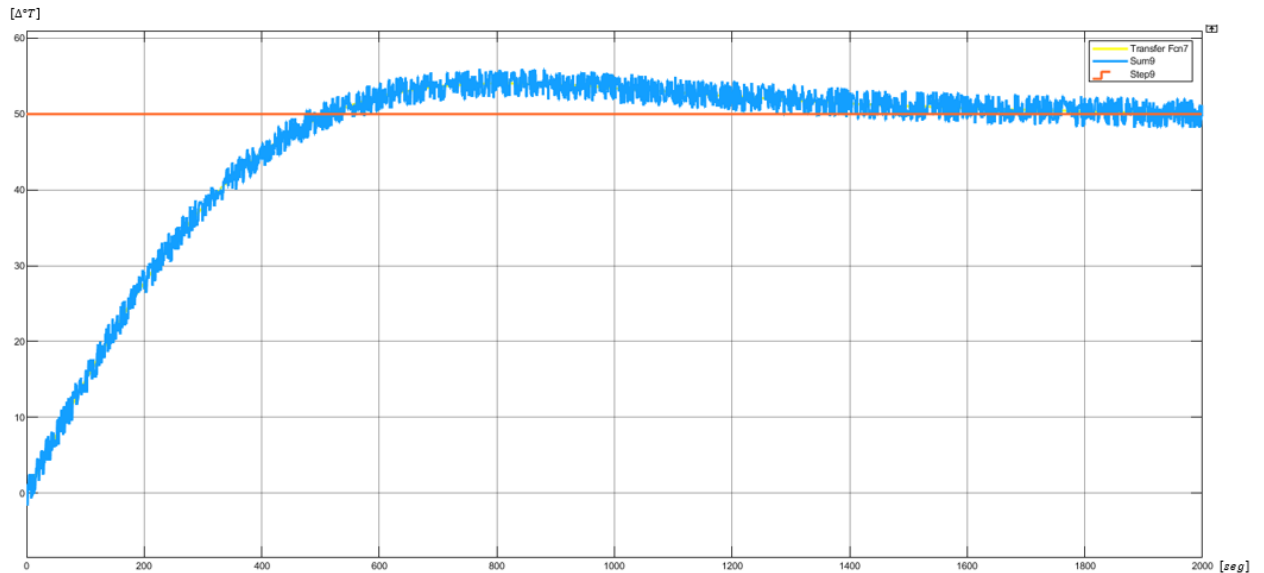
Figura 73. Sintonización función de transferencia método Isqnonlin.



Nota: Tomado de autores

Al considerar el ruido presente en la toma de datos de lazo abierto se introduce en el diagrama de bloques una perturbación para hacer la gráfica más aproximable a la obtenida.

Figura 74. Sintonización función de transferencia método Isqnonlin con perturbación.



Nota: Tomado de autores

En la parte de anexos se podrán encontrar los diferentes diagramas de bloques utilizados para la obtención de las gráficas anteriores.

7.5 Comparaciones constantes obtenida en la sintonización para cada ecuación de transferencia

En esta parte se hace la comparación de las constantes obtenidas, donde se validará el mejor modelo para la planta.

Tabla 18. Comparación de constantes K_p y K_i de los modelos matemáticos.

Parámetro	Método Smith	Método Van Der Grinten	Método Region Newton (Isqnonlin)	Trust-Reflective
K_p	4.888	1.2756	2.5163	
K_i	0.0188	0.0075037	0.020968	

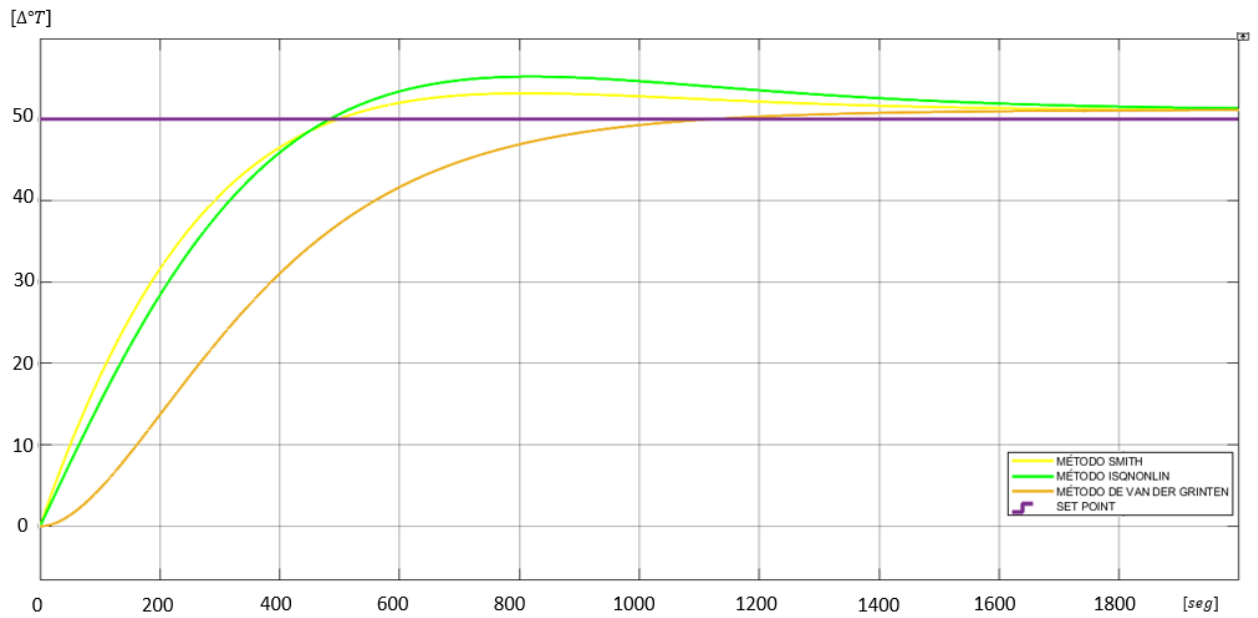
Nota: Tomado de autores.

Por medio del resultado se obtiene que el método Smith se sintoniza con K_p más alto, es decir cuenta con la más alta velocidad de respuesta del sistema, disminuye el error cuando se encuentra en régimen permanente, pero aumenta la inestabilidad del sistema, al igual cuenta con el K_i más alto de la comparativa, lo que significa que el sistema presenta una disminución del error en régimen permanente pero suma a la inestabilidad del propio sistema.

En cambio, el método de Van Der Grinten presenta el K_p más bajo, esto se traduce en una respuesta más lenta del sistema, con un mejor error en régimen permanente al igual que una mejor estabilidad del sistema en comparación con el método Smith.

La forma más sencilla de observar las variaciones de las constantes es de manera gráfica, a continuación, se presenta las tres funciones de transferencia con su respectiva sintonización.

Figura 75. Comparación de la sintonización de las funciones de transferencia.



Nota: Tomado de autores

De la anterior grafica podemos obtener:

Tabla 19. Parámetros de función de transferencia.

Parámetro	Método Smith	Método Van Der Grinten	Método Trust-Region Reflective Newton (Isqnonlin)
Tiempo de establecimiento [seg]	1100	1800	1400
Overshoot [%]	6.3	2.2	11
Best fit [%]	69.54	52.2	76.09

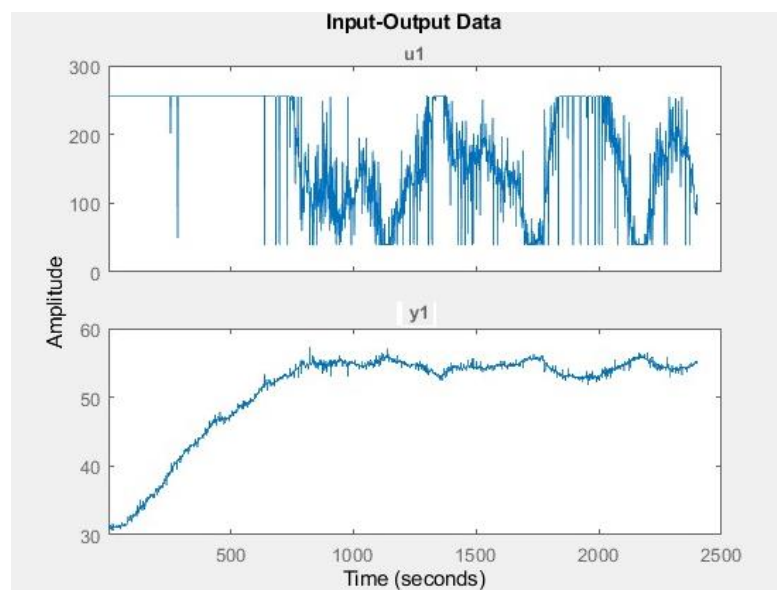
Nota: Tomado de autores

A partir de los tres controladores sintonizados se eligió el Isqnonlin, ya que fue el modelo con el mayor porcentaje de Best fit, es decir es el modelo que más se acerca al de la planta real, y por ende tendrá un comportamiento más aproximado.

7.6 Validación del controlador

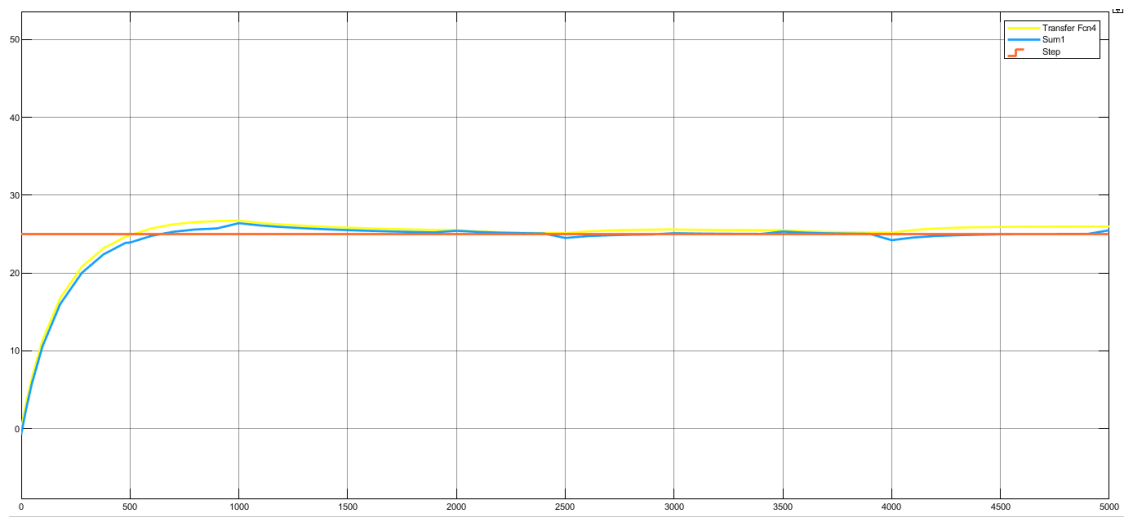
Para la validación del controlador se realizó dos pruebas, una con un set point y otra con dos set point.

Figura 76. Gráfica control de temperatura real.



Nota: Tomado de autores

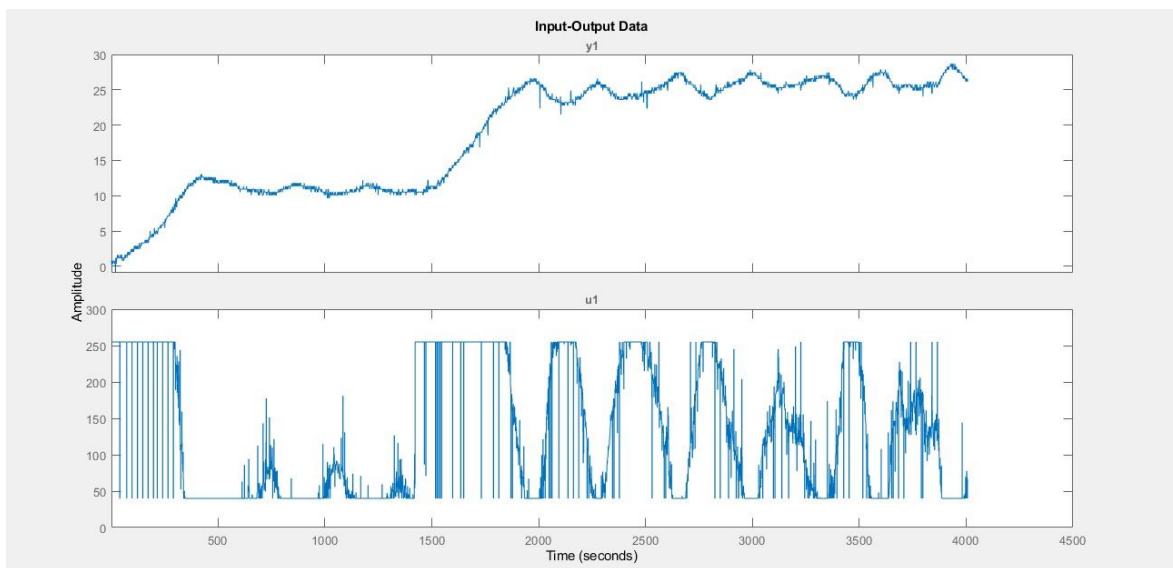
Figura 77. Gráfica control de temperatura simulada



Nota: Tomado de autores

Se puede observar que la curva tanto real como simulada tienen un comportamiento similar, salvo las pequeñas perturbaciones que se presentan en la planta debido que en la planta la acometida no posee polo a tierra, así como la variación de la temperatura ambiente. El controlador funciona de manera correcta pues trabaja con un porcentaje de error bajo.

Figura 78. Gráfica control de temperatura con dos sets point.



Nota: Tomado de autores

Se puede observar en la figura 55 que el controlador responde bien ante un cambio de set point en un trabajo continuo, por otro lado, se puede observar que cuando la temperatura se estabiliza hay ciertos momentos donde esta cae por debajo del error, esto basado en las pruebas hechas se debe a las condiciones climáticas en donde está ubicada la planta, ya que el clima es muy variante durante el día y la maquina está dentro de un cuarto cuyo techo es de Eternit y dentro del cuarto se siente los cambios de temperatura ambiente.

8. Conclusiones

Se modeló matemáticamente el proceso de variación de temperatura obteniéndose como resultado una función de transferencia de orden superior, esta fue obtenida por el método de Isqnonlin la cual obtuvo un Best fit de 76,09% lo que se considera un valor adecuado para su aplicación en el controlador.

En esta investigación, se desarrolló el modelo matemático utilizando tres enfoques distintos, todos ellos basados en la metodología de caja negra. Estos enfoques permitieron definir parámetros cruciales para la caracterización de la planta en estudio. A partir de una señal de entrada que controla el flujo másico de biomasa (cisco), se logró establecer una relación fundamental mediante funciones de transferencia que describen la respuesta del sistema en términos de la temperatura.

Se llegó a la conclusión de que los modelos aplicados son una herramienta capaz de interpretar el comportamiento de la planta, a pesar de la falta de conocimiento detallado sobre el funcionamiento interno del sistema, particularmente en el caso del horno de combustión. Esto se debe a que la combustión, junto con la transferencia de calor, exhibe un comportamiento intrínsecamente no lineal, lo que dificulta la creación de un modelo analítico basado en los principios físicos y químicos subyacentes.

Se realizó la sintonización por el método del lugar geométrico de las raíces, esta resultó ser una estrategia efectiva en nuestro proceso de diseño. En esta metodología, se establecieron ciertos requisitos de diseño cruciales. Por ejemplo, se definió que el tiempo de establecimiento debería ser menor que el tiempo real (1200 segundos), y que el porcentaje de sobre salto en la respuesta del sistema debería ser inferior al 5%.

Se concluye que la metodología del lugar geométrico de las raíces resulto ser un método de diseño y ajuste de controladores rápida y eficiente pues proporciona una representación gráfica intuitiva de cómo se comportaría un sistema en función de los cambios en los parámetros del controlador.

En la implementación de este proyecto, se optó por utilizar componentes de nivel industrial con el objetivo de garantizar la durabilidad y robustez del sistema. Esta elección se basó en la necesidad de mantener la integridad de la señal y asegurar la captación de datos sin perturbaciones. Sin embargo, debido a que la instalación eléctrica no tenía aterrizaje a tierra se presentaron ruidos en el sistema que no se pudieron atenuar a nivel de instrumentación.

Se realizó la validación del controlador implementado a través de dos pruebas significativas. En la primera prueba, se estableció un único punto de referencia (set point) para evaluar el rendimiento del controlador y en la segunda se establecieron dos puntos de referencia para poder evidenciar que el controlador puede llegar a temperaturas más altas para las que se sintonizó el controlador.

9. Presupuesto

Para la realización del presupuesto se tuvo en cuenta un 15% de imprevistos debido a la variación actual del dólar a nivel nacional lo que podría cambiar algunos de los precios considerados a continuación.

Tabla 20. Presupuesto del proyecto.

Item	Descripcion	Fuente de financiamiento	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Subtotal
1. Recursos humanos						
1.1	Director de proyecto	UIS	Hora	40	\$ 200.000,00	\$ 8.000.000,00
1.2	Codirector	UIS	Hora	120	\$ 80.000,00	\$ 9.600.000,00
1.3	Estudiante 1	Estudiante	Hora	640	\$ 15.000,00	\$ 9.600.000,00
1.4	Estudiante 2	Estudiante	Hora	640	\$ 15.000,00	\$ 9.600.000,00
				Total		\$ 36.800.000,00
2. Equipos						
2.1	Computador portatil	Estudiante	Unidad	1	\$ 4.500.000,00	\$ 4.500.000,00
2.2	Disco duro externo 1TB	Estudiante	Unidad	1	\$ 180.000,00	\$ 180.000,00
2.3	Multimetro	Estudiante	Unidad	1	\$ 58.000,00	\$ 58.000,00
2.4	Controllino MINI Arduino	Estudiante	Unidad	1	\$ 850.000,00	\$ 850.000,00
2.5	Sensor PT100	Estudiante	Unidad	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
2.6	Sensor SHT31 con cable	Estudiante	Unidad	1	\$ 58.000,00	\$ 58.000,00
2.7	Rotary Encoder	Estudiante	Unidad	1	\$ 480.000,00	\$ 480.000,00
2.8	Dimmer digital BTA312	Estudiante	Unidad	1	\$ 40.000,00	\$ 40.000,00
2.9	Fuente suicheada 24V 3A 72W	Estudiante	Unidad	1	\$ 210.000,00	\$ 210.000,00
2.10	Potenciometro digital	Estudiante	Unidad	2	\$ 24.000,00	\$ 48.000,00
2.11	Componentes industrial	Estudiante	Unidad	1	\$ 1.000.000,00	\$ 1.000.000,00
				Total		\$ 7.469.000,00
3. Software						
3.1	SolidWorks student	UIS	Mes	4	\$ -	\$ -
3.2	Microsoft office 365	UIS	Mes	4	\$ -	\$ -
3.3	MATLAB & Simulink	UIS	Mes	4	\$ -	\$ -
3.4	Arduino	Estudiante	mes	4	\$ -	\$ -
				Total		\$ -
4. Materiales						
4.1	Papeleria	Estudiante	Unidad	1	\$ 60.000,00	\$ 60.000,00
4.2	Estructura	Estudiante	Unidad	1	\$ 400.000,00	\$ 400.000,00
4.3	Componentes electronicos	Estudiante	Unidad	1	\$ 120.000,00	\$ 120.000,00
				Total		\$ 580.000,00
5. Otros						
5.1	Internet	Estudiante	Mes	4	\$ 90.000,00	\$ 360.000,00
5.2	Electricidad	Estudiante	\$/Kw*h	1200	\$ 600,00	\$ 720.000,00
5.3	Transporte	Estudiante	Mes	4	\$ 200.000,00	\$ 800.000,00
5.4	Viaticos	UIS	Mes	4	\$ 100.000,00	\$ 400.000,00
5.5	Poliza UIS	Estudiante	Unidad	2	\$ 16.500,00	\$ 33.000,00
5.6	Congresos	UIS	Unidad	2	\$ -	\$ -
5.7	Publicaciones revistas	UIS	Publicación	1	\$ -	\$ -
5.8	Recursos bibliograficos	Estudiante	Unidad	4	\$ -	\$ -
				Total		\$ 2.313.000,00
Costo parcial del proyecto						\$ 47.162.000,00
Costo parcial del proyecto de 2 integrantes						\$ 49.628.000,00
Imprevistos (15% Costo Parcial del Proyecto)						\$ 7.444.200,00
Costo Total del Proyecto						\$ 57.072.200,00

Nota: Elabora por autores

Referencias

- Burmester, K., & Eggers, R. (2010). Transferencia de calor y masa durante el proceso de secado del café. *Journal of Food Engineering*, 430-436.
- Cardona, J. P., J. Leal, J., & E. Ustariz, J. (2020). *Conicyt*. Obtenido de Modelado matemático de caja blanca y negra en educación en ingeniería: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/formuniv/v13n6/0718-5006-formuniv-13-06-105.pdf>
- Castillo, I. I. (2020). *Isidrolazaro.com*. Obtenido de Control Analógico: http://isidrolazaro.com/wp-content/uploads/2013/04/Control_Analogico_II.pdf
- Cera, C. (26 de Marzo de 2021). *appvizer*. Obtenido de Es el ciclo en V adecuado para la gestión de tu proyecto: <https://www.appvizer.es/revista/organizacion-planificacion/gestion-proyectos/ciclo-en-v>
- Cisneros, L. F., & Aguilar Sivirichi, B. A. (2020). *Repositorio Institucional*. Obtenido de Diseño de un sistema de secado automatizado para granos de café mediante transferencia térmica convectiva: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3526>
- Coronado, A. P., Roa Mejía, G., Oliveros Tascon, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2017). *Optimización Operacional de secadores mecánicos para café pergamino*. Obtenido de Cenicafé.org: <https://www.inceptioncoffee.com/partes-del-fruto-de-cafe/>
- Fuentes, A. C., & Pinto Rojas, O. I. (2019). *Repository. UNAB*. Obtenido de Diseño de controlador PID para prototipo de máquina de secado de café y/o cacao para la empresa Penagos Hermanos: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/7073?locale-attribute=en>

Jimenez, R. G. (1997). *La Transformada Z*. Obtenido de Analisis de sistemas y señales digitales:

<https://dctrl.fi->

[b.unam.mx/ricardo/Transformada%20Z/La%20Transformada%20Z_corregido.pdf](https://dctrl.fi-b.unam.mx/ricardo/Transformada%20Z/La%20Transformada%20Z_corregido.pdf)

M.A.Sfredo, J.R.D.Finzer, & J.R.Limaverde. (2005). Transferencia de calor y masa en el secado de frutos de café. *Journal of Food Engineering*, 15-25.

MathWorks. (2023). *Algoritmo de minimos cuadrados* . Obtenido de

<https://la.mathworks.com/help/optim/ug/least-squares-model-fitting-algorithms.html>

Meneses, J. E. (2020). *Automatizacion Industrial*. Bucaramanga.

Morales, L. A. (2009). *Analisis de parametros y seleccion de hornos para la combustion de biomasa*. Obtenido de Escuela superior politecnica del litoral.

Mundo Cafeto. (19 de Mayo de 2019). *Mundo Cafeto, del Cafeto a la Taza*. Obtenido de

<https://mundocafeto.com/beneficiado/despulpado-del-cafe-cereza/>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.

Ortega, A. O. (2015). *Enfoques e Investigacion* . Obtenido de Researchgate:

https://www.researchgate.net/publication/326905435_ENFOQUES_DE_INVESTIGACION

ON

Ricardo, R. (10 de Noviembre de 2020). *Estudyando*. Obtenido de Modelo en forma de V en la

metodlogia SDLC: [https://estudyando.com/modelo-en-forma-de-v-en-la-metodologia-](https://estudyando.com/modelo-en-forma-de-v-en-la-metodologia-sdlc/)

[sdlc/](https://estudyando.com/modelo-en-forma-de-v-en-la-metodologia-sdlc/)

Soeswanto, B., Lintang Edi Wahyuni, N., & Prihandini, G. (2021). El desarrollo del proceso de secado de granos de café. *2do Seminario Internacional de Ciencia y Tecnología Aplicada (ISSAT 2021)*. Atlantis Press International BV.

Solarte, E. P., & Sanches Reyes, S. A. (2010). *Repositorio.Unicauca*. Obtenido de Diseño de un control de humedad y temperatura para un secador de cafe: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1938/DISE%C3%91O%20DE%20UN%20CONTROL%20DE%20HUMEDAD%20Y%20TEMPERATURA%20DE%20PARA%20UN%20SECADOR%20DE%20CAF%C3%89.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vergara, S. (27 de Julio de 2020). *Inception Coffee*. Obtenido de Partes del fruto del cafe: <https://www.inceptioncoffee.com/partes-del-fruto-de-cafe/>

Villalba, L. C., Duque Grisales, E. A., & Rodriguez, I. (2017). *Revista Espacios*. Obtenido de Estado del arte de las tecnologías de secado de cafe en Colombia y su desarrollo global: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n29/17382927.html>

Villalba, L. C., Grisales, E. A., & RODRÍGUEZ, I. (2017). Estado del arte de las tecnologías de secado de. *Espacios*.

Apéndices

Apéndice A. Código Arduino

```
#include <SPI.h>
#include <TimerOne.h> // tiempo muestreo toma de datos
volatile long int Time=0;
float Y = 0.0;
float alpha = 0.05;
float S = Y;
int valorsensor = 0;

bool arranque=A1;
bool pid=A2;
bool pinAzul=7; //BOMBILLA AZUL
bool pinN=6; //BOMBILLA NARANJA
int Pot_temp=A3;
bool led_alarma=8;
bool alarma=9;

byte address = 0x00;
int CS = 10; //MOTOR
bool ssl = 4;
bool ss2 = 5;
int digitalPotWrite;
String msg1 = "Ingrese valor de potencia"; //MOTOR
String pot = "";
```

```
int pinA = 3;
int pinB = 2;
volatile int contador = 0;
unsigned long previousMillis = 0; //ENCODER
long interval = 500;
float REV;

double K=2.5163; // K del PID
double Ki=0.020968; // Ti del PID
//double Td=0.25*Ti; //Td del PID
double Ts=1;
double SenalEsfuerzo=0;
double SetPoint=0;
double VarProceso=0;
double e=0;
double et0=0;
double up=0;
double ui=0;
double ud=0;
double uit0=0;
double escalon=0;
```

```
void setup() {
  Timer1.initialize(10000);      //Configura el TIMER en 10 milisegundo
  Timer1.attachInterrupt(Temporizador) ; //Configura la interrupción del Timer 1
  Serial.begin(9600);

  pinMode(pinA, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), interrupcion1, CHANGE); //ENCODER
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), interrupcion2, CHANGE);

  pinMode (CS, OUTPUT);
  pinMode (ss1, OUTPUT);
  pinMode (ss2, OUTPUT);          //MOTOR
  ss1 = 1;
  ss2 = 1;
  SPI.begin();

  pinMode (arranque,INPUT); //selector
  pinMode (pid,INPUT);      //selectro
  pinMode (6, OUTPUT); //azul
  pinMode (7, OUTPUT); //naranja
  pinMode (8, OUTPUT); // alarma
  pinMode (9, OUTPUT); // LED alarma
}
```

```
void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if ((currentMillis - previousMillis) >= interval)
  {
    previousMillis = currentMillis;          //ENCODER
    REV = contador * (60.0 / (2400.0 * 0.5));
    contador = 0;
  }

  Serial.print(arranque);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(pid);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(Pot_temp);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(SenalEsfuerzo);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(escalon);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(S);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(Y);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(REV);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(up);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(ui);
  delay(979);
}
```

```
pid=analogRead(A2);
if(REV<3&&S>55&&pid==HIGH) {
  digitalWrite(8,HIGH);
  digitalWrite(9,HIGH);}
else{
  digitalWrite(8,LOW);
  digitalWrite(9,LOW);}
if(ui>6,5&&pid==HIGH) {
  digitalWrite(8,HIGH);
  digitalWrite(9,HIGH);}
else{
  digitalWrite(8,LOW);
  digitalWrite(9,LOW);}

//MOTOR
if (Serial.available()) {
  pot = Serial.readStringUntil(10);
}
```

```

    arranque=analogRead(A1);
    pid=analogRead(A2);
    if(arranque==LOW&&pid==LOW){SenalEsfuerzo=0;}
    if(arranque==HIGH){
        SenalEsfuerzo=40;
        digitalWrite(7,HIGH);}
    else {digitalWrite(7,LOW);}

    digitalWrite(ss1, LOW);
    digitalWrite(CS, LOW);
    SPI.transfer(address);
    SPI.transfer(SenalEsfuerzo);
    digitalWrite(CS, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(ss1, HIGH);           //MOTOR
    digitalWrite(ss2, LOW);
    digitalWrite(CS, LOW);
    SPI.transfer(address);
    SPI.transfer(SenalEsfuerzo);
    digitalWrite(CS, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(ss2, HIGH);

    if(pid==HIGH){
        digitalWrite(6,HIGH);
        SetPoint=Pot_temp+1;
        //SetPoint=digitalPotWrite;
        VarProceso=S;
        e=SetPoint-VarProceso;
        up=K*e;
        ui=uit0+(Ki)*e;
        //ud=(K*Td/Ts)*(e-et0);
        SenalEsfuerzo=up+ui+ud;
        uit0=ui;
        et0=e;
        escalon=SenalEsfuerzo;
        if (SenalEsfuerzo<0){SenalEsfuerzo=0;}
        if (SenalEsfuerzo>255){SenalEsfuerzo=255;};
    }
    else{digitalWrite(6,LOW);}
}

```

```
void interrupcion1 () {
    contador++;
}
//ENCODER
void interrupcion2 () {
    contador++;
}
void Temporizador(void)
{
    valorsensor = analogRead(A0);
    float voltaje = valorsensor * (5 / 168.0) * 14.22 + 24; //SENSOR RTD PT100
    Y = voltaje;
}
```

