

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL REACTOR DE LA GASIFICADORA DEL PROYECTO
TRANSBIOENERGY**

CÓDIGO DE PROYECTO: PG-24-1-06



Giuliano Kaligare Alvarado

CÓDIGO: 430068419

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1034776348

José Alejandro Ballesteros Arias

CÓDIGO: 430068544

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1013099205

José Alejandro Torres Arias

CÓDIGO: 430068555

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1013097388

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

BOGOTÁ, D.C.

2026

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL REACTOR DE LA GASIFICADORA DEL PROYECTO
TRANSBIOENERGY**

Giuliano Kaligare Alvarado

CÓDIGO: 430068419

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1034776348

José Alejandro Ballesteros

CÓDIGO: 430068544

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1013099205

José Alejandro Torres Arias

CÓDIGO: 430068555

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1013097388

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD
PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

Ingeniero Néstor Fernando Penagos Quintero

CO-DIRECTOR:

Ingeniero Baldomero Méndez Pallares

CO-DIRECTOR:

Químico Rafael Alberto Fonseca Correa

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.**

2026

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



Director del Proyecto: Néstor Penagos



Codirector del Proyecto: Rafael Fonseca



Codirector del Proyecto: Baldomero Méndez

DEDICATORIA

A nuestros padres, quienes han sido el pilar fundamental en nuestro proceso académico y personal, brindándonos su apoyo incondicional, esfuerzo constante y motivación para alcanzar cada una de nuestras metas. Su acompañamiento ha sido determinante para superar los desafíos presentados a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestros docentes, quienes con su conocimiento, orientación y exigencia académica contribuyeron significativamente al desarrollo de este proyecto, fortaleciendo nuestras capacidades técnicas y nuestro criterio ingenieril. Su compromiso con la formación integral ha sido clave en la consolidación de nuestras habilidades como futuros ingenieros mecatrónicos.

Finalmente, dedicamos este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron al cumplimiento de este objetivo, ya sea mediante apoyo académico, acompañamiento personal o motivación constante durante este proceso. Este logro no solo representa un avance profesional, sino también el resultado de un esfuerzo colectivo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial a nuestros tutores y directores de proyecto, quienes brindaron su orientación, conocimiento y acompañamiento constante durante el desarrollo de este trabajo. Su guía técnica y académica fue fundamental para la correcta estructuración del proyecto y para el fortalecimiento de nuestras competencias en el área de la ingeniería mecatrónica.

De igual forma, expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Piloto de Colombia y a la Facultad de Ingeniería, por proporcionarnos las herramientas, el entorno académico y los recursos necesarios para nuestra formación profesional y la realización de este proyecto de grado.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, esfuerzo y comprensión a lo largo de este proceso. Su respaldo fue esencial para culminar esta etapa académica y alcanzar este logro profesional.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo, ya sea mediante apoyo académico, técnico o personal, aportando al cumplimiento de los objetivos planteados.

TABLA DE CONTENIDO

NOTA DE ACEPTACIÓN	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE ANEXOS.....	11
INTRODUCCIÓN	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	13
1. GENERALIDADES	14
1.1. Planteamiento del problema	14
1.1.1. Antecedentes del problema	14
1.1.2. Descripción del problema	14
1.1.3. Formulación del problema	15
1.1.4. Línea de investigación del programa	15
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
1.4. Delimitación del proyecto.....	16
1.4.1. Alcances	16
1.4.2. Limitaciones	16
1.5. MARCO REFERENCIAL	16
1.5.1. Marco Teórico.....	16
1.6. ESTADO DEL ARTE.....	20
1.6.1. Control Adaptativo en Reactores de Pirólisis	20
1.6.2. Regulación Térmica con Controladores Difusos	21
1.6.3. Calentamiento por Microondas en Reactores de Pirólisis	22
1.6.4. Caracterización y Diseño de Reactores en Colombia	23
1.6.5. Control Robusto y Viabilidad Técnica en Pirólisis	24
1.7. Marco Normativo.....	25
1.8. MARCO METODOLOGICO	26
1.8.1. Enfoque metodológico	26
1.8.2. Tipo de investigación	26
1.8.3. Diseño metodológico general	26

1.8.4. Diagrama de la metodología.....	28
--	----

2. ANÁLISIS DE CONDICIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL REACTOR29

2.1. Características del reactor existente	29
2.1.1. Dimensiones y material	29
2.1.2. Implicaciones térmicas de la geometría del reactor	30
2.2. Propiedades de la biomasa: BAGAZO DE CAÑA Y residuos de guadua	31
2.2.1. Caracterización física y térmica de la biomasa	31
2.2.2. Requerimientos térmicos para el calentamiento.....	32
2.3. ANÁLISIS TÉRMICO Y ENERGÉTICO DEL PROCESO	33
2.3.1. Requerimientos Energéticos para el Calentamiento	34
2.3.2. Distribución Energética del Sistema	34
2.4. Selección y Análisis de Materiales	35
2.4.1. Sistema de Aislamiento Térmico	35
2.4.2. Cálculo de Pérdidas Térmicas	35
2.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO	38
2.5.1. Importancia del Sistema de Calentamiento	38
2.5.2. Enfoque del Diseño	38
2.6. Balance Energético y Transferencia de Calor	38
2.6.1. Introducción teórica	39
2.6.2. Fundamentos físicos.....	39
2.6.3. Transferencia de calor en sistemas aislados.....	39
2.6.4. Aplicaciones industriales	39
2.7. Especificaciones Técnicas Finales del Sistema	39
2.7.1. Tipo de resistencia.....	39
2.7.2. Material de la Resistencia.....	41
2.7.3. Alimentación eléctrica.....	42
2.7.4. Valor Eléctrico de la Resistencia	42
2.7.5. Sistema de control	43
2.7.6. Protecciones y seguridad eléctrica	43

3. CARACTERIZACIÓN del control de temperatura en PLC Siemens LOGO! 8.3.....44

3.1.1. Criterios de selección de componentes.....	47
3.1.2. Descripción del programa en LOGO!Soft ComfortD.....	48
3.1.3. Funcionamiento de la lógica de control	48
3.1.4. Parámetros de control utilizados	50
3.1.5. Justificación del uso de una única salida.....	50
3.1.6. Justificación del uso del control PI–PWM frente al control ON–OFF	51
3.2. Plano de conexión	52
3.2.1. Plano de Conexión General.....	52
3.2.2. Descripción del Plano de conexión.....	55
3.2.3. Sistema de Alimentación y Potencia	55
3.2.4. Módulo de expansión del LOGO!	56
3.2.5. Función: Ambas señales entran como señales análogas para ser procesadas en la programación del control.	56
3.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL DE TEMPERATURA	56
3.3.1. Arquitectura General del Sistema.....	56
3.3.2. Beneficios del Diseño Propuesto.....	57
3.4. Diseño INTERFAZ(HMI)	57

3.4.1. Objetivos de la interfaz HMI	57
3.4.2. Arquitectura general de la HMI	58
3.4.3. Variables del sistema representadas en la HMI	58
3.4.4. Lógica funcional del control representada en el código.....	59
3.4.5. Diseño de las pantallas HMI	60
3.4.6. Representación visual del hardware.....	65
4. SISTEMA DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN EN MATLAB	66
4.1. Estructura general de la simulación.....	66
4.2. Modelo térmico del reactor	69
4.3. Control PI-PWM	69
4.4. OBTENCION DE PARAMETROS DEL CONTROLADOR	70
4.5. Implementacion PI-PWM	70
4.6. Discretización del modelo y simulación	71
4.7. Resultados de simulación	72
4.8. Validación del calentamiento del reactor hasta temperatura objetivo	72
4.9. Evaluación del sistema ante perturbaciones térmicas.....	72
4.10. Evaluación del controlador ante perfiles térmicos programados	73
4.11. Análisis del comportamiento del controlador PI.....	74
4.12. Análisis y discusión.....	75
5. CONCLUSIONES	78
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	79
referencias bibliográficas	80
ANEXO 01. CODIGO FUENTE DEL MODELO DE SIMULACION EN MATLAB	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del bagazo de caña y residuos de guadua	Pág. 32
Tabla 2. Comparativo de propiedades.	Pág. 35
Tabla 3. Pérdidas térmicas por material.	Pág. 36
Tabla 4. Espesor Requerido para Pérdidas Máximas de 40 W.	Pág. 36
Tabla 5. Análisis de Resistencias Térmicas.	Pág. 37
Tabla 6. Propiedades Térmicas del Acero AISI310	Pág. 42
Tabla 7. Propiedades Térmicas del Acero AISI304	Pág. 42
Tabla 8. Comparación entre PLC Siemens LOGO! 8.3 y PLC industrial genérico.	Pág. 45
Tabla 9. Comparación entre PLC Siemens LOGO! 8.3 y PLC industrial genérico.	Pág. 45
Tabla 10. Componentes principales del sistema.	Pág. 47
Tabla 11. Parámetros de control utilizados.	Pág. 50
Tabla 12. Comparativo sistema ON-OFF y control PI-PWM.	Pág. 51
Tabla 13. Componentes Sensitivos, Eléctricos y Control del Diagrama eléctrico.	Pág. 54
Tabla 14. Variables del HMI.	Pág. 59
Tabla 15. Estructura de simulación.	Pág. 66
Tabla 16. Modelo térmico.	Pág. 69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación proceso de pirólisis.	Pág. 17
Figura 2. Ejemplo de controlador de reactor.	Pág. 18
Figura 3. Tipos de transferencia de calor.	Pág. 19
Figura 4. Control Adaptativo en Reactores.	Pág. 21
Figura 5. Plano Regulación Térmica con Controladores Difusos.	Pág. 22
Figura 6. Calentamiento por Microondas en Reactores.	Pág. 23
Figura 7. Diseño de Reactores en Colombia.	Pág. 24
Figura 8. Control Robusto y Viabilidad Técnica en Pirólisis.	Pág. 25
Figura 9. Dimensiones y medidas reactor.	Pág. 30
Figura 10. Resistencia Helicoidal en Acero Inox.	Pág. 41
Figura 11. Esquema funcional de control	Pág. 46
Figura 12. Lógica del control de temperatura en LOGO!Soft Comfort.	Pág. 48
Figura 13. Gráfica de la respuesta térmica del sistema en simulación.	Pág. 49
Figura 14. Plano conexiones.	Pág. 53
Figura 15. Arquitectura general HMI.	Pág. 58
Figura 16. Interfaz pantalla principal.	Pág. 61
Figura 17. Interfaz pantalla de control.	Pág. 62
Figura 18. Interfaz pantalla de alarmas.	Pág. 63
Figura 19. Interfaz pantalla de tendencias.	Pág. 64
Figura 20. Estructura general del modelo PI–PWM en MATLAB.	Pág. 68
Figura 21. Señal de control PI–PWM: Duty (%) y temperatura (°C).	Pág. 71
Figura 22. Respuesta del sistema ante caída térmica simulada: Temperatura del reactor y señal PWM.	Pág. 72
Figura 23. Comparación entre los perfiles térmicos programados y la respuesta térmica simulada del reactor para pendientes de calentamiento de 5, 10 y 20 °C/min	Pág. 73
Figura 24. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 5°C/min.	Pág. 74
Figura 25. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 10°C/min.	Pág. 74
Figura 26. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 20°C/min.	Pág. 76

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 01. Código fuente de simulación del modelo de Matlab.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar fuentes de energía sostenibles y eficientes ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas como la gasificación de biomasa, un proceso que permite convertir residuos orgánicos en combustibles limpios como el gas metano (Basu, 2010; McKendry, 2002). Este proceso se basa en la pirólisis, una técnica termoquímica que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando gases combustibles, alquitrán y carbón vegetal (Bridgwater, 2012). La eficiencia y estabilidad del proceso dependen en gran medida del control preciso de la temperatura dentro del reactor (Knoef, 2012).

En el marco del proyecto TransBioEnergy, se plantea la necesidad de rediseñar el sistema de calefacción del reactor utilizado en la gasificadora, con el fin de mejorar el rendimiento térmico del sistema y garantizar condiciones óptimas para la producción de gas metano. La implementación de un sistema de control térmico confiable permitirá estabilizar los parámetros operativos durante el ciclo completo de pirolisis, aumentando la eficiencia energética y la calidad del gas generado.

Este proyecto tiene como objetivo principal el diseño de un sistema de calentamiento eléctrico, complementado por un controlador de temperatura con interfaz de usuario, que permita supervisar y mantener los niveles térmicos adecuados dentro del reactor. Además, se realizarán simulaciones y validaciones matemáticas del diseño utilizando herramientas de software especializado, con el propósito de asegurar la viabilidad técnica del sistema antes de su implementación física. El desarrollo de este sistema representa un aporte significativo en el campo de las energías renovables, integrando conocimientos de ingeniería mecatrónica para resolver una necesidad concreta en la transformación de biomasa en energía limpia.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y simulación de un sistema de calentamiento para el reactor de una gasificadora, en el marco del proyecto TransBioEnergy. Este sistema busca optimizar el proceso de pirolisis de biomasa para la generación de gas metano, mediante el control preciso de la temperatura interna del reactor. La propuesta incluye el diseño de un sistema eléctrico de calefacción acompañado de un controlador de temperatura, que permita mantener condiciones térmicas estables durante todo el ciclo operativo.

Se llevará a cabo la caracterización térmica del reactor, considerando su capacidad volumétrica, materiales de construcción y parámetros críticos del proceso. Con base en estos datos, se diseñará una interfaz de control que registre y visualice en tiempo real el comportamiento del sistema, y se validará el desempeño mediante simulaciones computacionales y modelado matemático. El proyecto contempla como principal limitación la imposibilidad de realizar pruebas físicas por restricciones presupuestarias, por lo que se hará énfasis en la simulación y análisis de resultados.

Este trabajo busca aportar al desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles, integrando conocimientos de automatización, control térmico y energía renovable, y proponiendo una solución viable y replicable en proyectos similares de aprovechamiento energético de residuos orgánicos.

Palabras clave: pirolisis, gasificación, biomasa, controlador de temperatura, reactor, energías renovables.

ABSTRACT

This project aims to design and simulate a heating system for the reactor of a gasification unit, developed as part of the TransBioEnergy project. The system seeks to optimize the pyrolysis process of biomass for methane gas production through precise internal temperature control of the reactor. The proposal includes the design of an electric heating system coupled with a temperature controller, allowing for stable thermal conditions throughout the entire operating cycle.

Thermal characterization of the reactor will be performed, considering its volume capacity, construction materials, and critical process parameters. Based on these data, a control interface will be developed to record and display the system's behavior in real time. Performance will be validated through computer simulations and mathematical modeling. Due to budget constraints, physical testing is not included, and the focus will instead be on digital validation and analysis.

This project contributes to the development of clean and sustainable technologies by integrating knowledge of automation, thermal control, and renewable energy. It offers a viable and replicable solution for similar waste-to-energy initiatives.

Keywords: pyrolysis, gasification, biomass, temperature controller, reactor, renewable energy.

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El reactor presenta fallas en su sistema de calentamiento, lo que genera inestabilidad en la temperatura.

1.1.1. Antecedentes del problema

La crisis energética mundial y la preocupación creciente por el cambio climático han impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas para la producción de energía limpia y sostenible. En este contexto, la gasificación de biomasa mediante procesos termoquímicos se presenta como una solución prometedora para convertir residuos lignocelulósicos en combustibles útiles, especialmente gas metano. Este proceso se fundamenta en la pirólisis, que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno y cuya eficiencia depende en gran medida del control preciso de la temperatura dentro del reactor, ya que las variaciones térmicas pueden afectar tanto la calidad del gas producido como el rendimiento energético del sistema.

En Colombia, la abundancia de residuos agrícolas, agroindustriales y forestales ha motivado el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa, con un potencial estimado entre 204,8 y 235,3 PJ (Petajulio) y una capacidad instalada de hasta 2.111,3 MW si se emplea la gasificación. (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Sin embargo, la implementación exitosa de estas tecnologías exige sistemas de control térmico confiables y eficientes. En respuesta a esta necesidad, el proyecto TransBioEnergy se orienta al desarrollo de soluciones para la conversión de biomasa en energía limpia, donde el reactor de gasificación representa el núcleo del proceso y requiere mantener condiciones térmicas estrictas para asegurar la producción óptima de gas metano.

1.1.2. Descripción del problema

El reactor de gasificación del proyecto TransBioEnergy enfrenta deficiencias significativas en su sistema de calentamiento, lo que impide mantener un control térmico preciso durante la pirólisis. Entre los principales problemas se encuentran la inestabilidad térmica, que provoca fluctuaciones de temperatura y afecta la calidad y cantidad del gas metano producido, así como la falta de automatización, que obliga a una operación manual continua y eleva el riesgo de errores. Además, la ausencia de monitoreo en tiempo real y de una interfaz de usuario eficiente limita la capacidad de los operadores para supervisar y optimizar el proceso, mientras que la ineficiencia energética incrementa el consumo y reduce el rendimiento general del sistema.

Estas limitaciones comprometen tanto la viabilidad técnica como económica del proyecto, dificultando su consolidación como una alternativa efectiva para la producción de energía limpia y restringiendo su potencial de escalamiento industrial.

1.1.3. Formulación del problema

¿Cómo diseñar un sistema de calentamiento y control térmico para el reactor de una gasificadora de biomasa que permita mejorar la eficiencia y estabilidad del proceso de pirólisis para la generación de gas metano?

1.1.4. Línea de investigación del programa

Este proyecto se enmarca en dos líneas de investigación del programa de Ingeniería Mecatrónica:

- **Energías renovables**, al tratarse de una propuesta que contribuye al desarrollo de sistemas sostenibles para la generación de energía limpia.
- **Automatización y domótica**, por la implementación de un sistema de control automatizado del proceso térmico dentro del reactor.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La implementación de un sistema de calentamiento y control térmico automatizado para el reactor de gasificación está plenamente justificada desde diversas perspectivas. Técnicamente, el control preciso de la temperatura es esencial para la eficiencia del proceso de pirólisis, ya que mantener temperaturas estables entre 400°C y 800°C optimiza la producción de gases combustibles y minimiza la generación de subproductos no deseados, lo cual solo es posible mediante la automatización. Desde el punto de vista ambiental, este tipo de tecnología contribuye a la reducción de residuos orgánicos y promueve la producción de energía renovable, maximizando la eficiencia energética y minimizando el impacto ambiental.

Económicamente, un sistema automatizado reduce los costos operativos al disminuir el consumo energético, la necesidad de supervisión manual y el desgaste del equipo, prolongando su vida útil. Además, el proyecto tiene un alto valor académico al integrar conocimientos multidisciplinarios propios de la Ingeniería Mecatrónica y ofrecer una experiencia de aprendizaje aplicada. Socialmente, impulsa la soberanía energética y puede beneficiar a comunidades rurales con abundantes residuos orgánicos, mientras que, desde una perspectiva innovadora, fortalece el desarrollo tecnológico nacional en el sector de energías renovables, clave para el desarrollo sostenible del país.

1.3. OBJETIVOS

Con la justificación nos da paso a la creación del objetivo General y objetivos Específicos:

1.3.1. Objetivo general

Diseñar el sistema de calentamiento y control para el reactor de la gasificadora del proyecto TransBioEnergy, con el fin de optimizar el proceso de pirólisis para la generación de gas metano.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las condiciones requeridas para el diseño del sistema de calentamiento del reactor de la gasificadora, teniendo en cuenta la capacidad, temperatura y material del reactor.
- Caracterizar el sistema de control para el calentamiento del reactor y hacer una interfaz del controlador.
- Realizar las validaciones de funcionamiento, implementado un modelo matemático para confirmar los resultados obtenidos mediante el uso de diferentes softwares.

1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

Se Aterriza el proyecto diciendo que alcances y limitaciones se presenta con el mismo.

1.4.1. Alcances

- **Optimización del Proceso de Pirolisis y Gasificación:** Lograr diseñar el sistema de control que permita mantener la temperatura en un rango optimo, asegurando la eficiencia en la producción de gas de metano.
- **Registro y Análisis de Datos:** Incorporar el registro de datos de las temperaturas en tiempo real mediante un controlador, permitiendo el seguimiento detallado del comportamiento térmico del sistema durante todo el ciclo de operación.
- **Interfaz de Usuario:** Desarrollo de una interfaz de control que facilite la operación de la gasificadora.
- **Pruebas Experimentales:** Realización de pruebas de simulación para validar el desempeño del sistema de control de temperatura y recopilar datos empíricos que respalden el diseño y la optimización del proceso de gasificación.

1.4.2. Limitaciones

- **Implementación física:** No se realizará implementación física del sistema por restricciones presupuestarias.
- **Capacidad del reactor:** La capacidad máxima de producción de gas metano va a ser pequeña por la cantidad que procesa el reactor debido a sus dimensiones de 5,067217 L.

1.5. MARCO REFERENCIAL

Definiciones Técnicas, Teóricas sobre la tesis con referencias de artículos científicos.

1.5.1. Marco Teórico

Manejo de ecuaciones, Imágenes y funcionamiento de una gasificadora de forma técnica y teórica.

1.5.1.1. Fundamentos de la Gasificación y Pirólisis

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte materiales carbonosos, como la biomasa, en un gas combustible mediante la aplicación de calor en condiciones controladas de oxígeno o vapor. Este proceso se desarrolla en cuatro etapas principales: secado, pirólisis, oxidación y reducción.

Pirólisis: Constituye la etapa central del proceso de gasificación. Se define como la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, que ocurre típicamente entre 400°C y 800°C como se evidencia en la Figura 1. Durante esta etapa, los componentes orgánicos se descomponen produciendo:

Gases combustibles (metano, monóxido de carbono, hidrógeno)

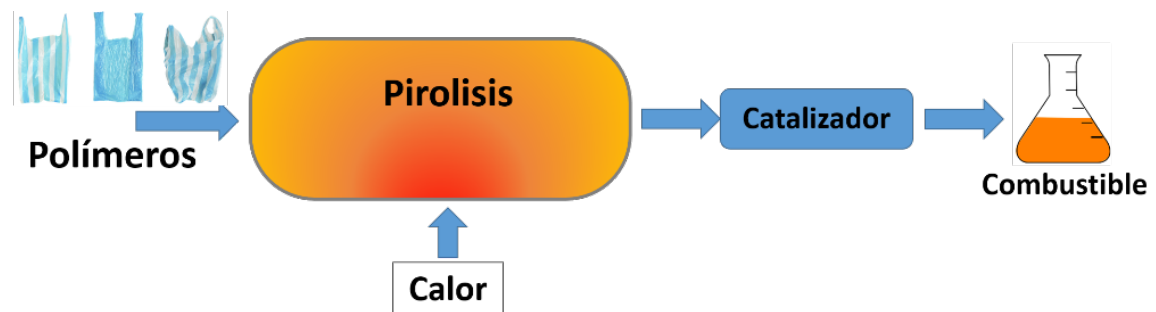
Líquidos condensables (bio-aceites)

Residuos sólidos (carbón vegetal)

Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.

La distribución de estos productos depende crítica mente de las condiciones operativas, especialmente la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia.

Figura 1. Representación proceso de pirolisis



Fuente: <https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pirolisis-catalitica-de-residuos-plasticos-para-producir-combustibles>

1.5.1.2. Cinética del Proceso:

La pirólisis de biomasa sigue una cinética de primer orden para cada componente (celulosa, hemicelulosa, lignina). La ecuación general de Arrhenius describe la velocidad de reacción:

$$K = A e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (1.1)$$

Donde:

- K = constante de velocidad de reacción
- A = factor pre-exponencial

- E = energía de activación
- R = constante universal de los gases
- T = temperatura absoluta

1.5.1.3. Control Térmico en Reactores

El control térmico en reactores de pirólisis es fundamental para mantener las condiciones óptimas del proceso. Los sistemas de control térmico emplean diferentes estrategias además de venir en diferentes presentaciones como el ejemplo en la Figura 2, además estos usan algunos métodos como lo son:

Control PID: Los controladores Proporcional-Integral-Derivativo son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales para el control de temperatura. La ecuación del controlador PID es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d x \frac{de(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Donde:

- $u(t)$ = señal de control
- $e(t)$ = error entre setpoint y variable medida
- K_p, K_i, K_d = constantes proporcional, integral y derivativa

Figura 2. Ejemplo de controlador de reactor.



Fuente: <https://www.parrinst.com/es/products/controllers/4848-reactor-controller/specifications/>

1.5.1.4. Transferencia de Calor:

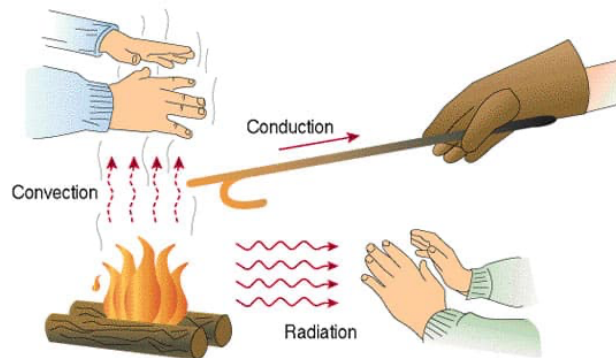
El diseño del sistema de calentamiento debe considerar los mecanismos de transferencia de calor como se observa en la figura 3:

Conducción: Transferencia a través del material del reactor

Convección: Transferencia entre el gas y las paredes del reactor

Radiación: Transferencia por emisión electromagnética a altas temperaturas

Figura 3. Tipos de transferencia de calor.



Fuente: <https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>

1.5.1.5. Sistemas de Calentamiento Eléctrico

Las resistencias eléctricas son elementos calefactores que convierten energía eléctrica en energía térmica mediante el efecto Joule. La potencia disipada se calcula según:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{I^2}{R} \quad (1.3)$$

Dónde:

- P = potencia disipada (W)
- V = voltaje aplicado (V)
- I = corriente eléctrica (A)
- R = resistencia eléctrica (Ω)

Ventajas de las resistencias eléctricas:

- Control preciso de temperatura
- Respuesta rápida a cambios de consigna

- Eficiencia energética superior al 90%
- Facilidad de automatización
- Bajo mantenimiento

1.5.1.6. Sistemas de Adquisición de Datos y Control

Los sistemas modernos de control integran hardware y software para el monitoreo y control de procesos industriales:

- **Sensores de Temperatura:** Los termopares tipo K (Cromel-Alumel) son ampliamente utilizados para medición de temperatura en el rango de 0°C a 1000°C, con precisión de $\pm 1,5^\circ\text{C}$.
- **Interfaces HMI:** Las interfaces Humano-Máquina permiten la visualización de datos del proceso y el control de variables. Proporcionan:
 - Visualización gráfica de tendencias
 - Configuración de alarmas
 - Registro histórico de datos
 - Control remoto de equipos
- **Comunicaciones Industriales:** Los protocolos de comunicación como Modbus, Ethernet/IP y OPC facilitan la integración de equipos en sistemas de control distribuido.

1.6. ESTADO DEL ARTE

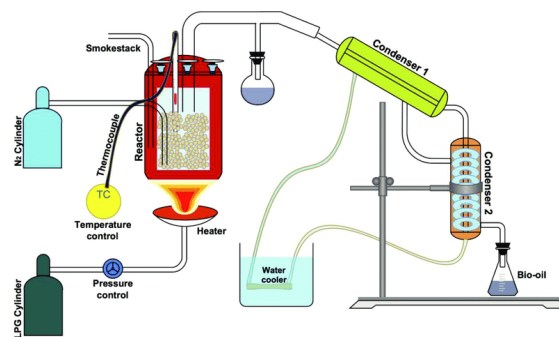
Se anexaron proyectos relacionados con el objetivo que se busca y el proceso que se quiere trabajar.

1.6.1. Control Adaptativo en Reactores de Pirólisis

En años recientes se han desarrollado investigaciones orientadas al diseño e implementación de sistemas de control y monitoreo aplicados a reactores de pirólisis. El propósito principal de estos trabajos ha sido mejorar la estabilidad térmica del proceso y optimizar la conversión del material, considerando las variaciones inherentes en la composición y flujo de la materia prima. Para alcanzar este objetivo, se han elaborado modelos dinámicos del reactor que representan las interacciones térmicas y de transferencia de masa del sistema, los cuales sirven como base para el diseño de controladores avanzados. Dichos controladores ajustan sus parámetros de acuerdo con las condiciones operativas, permitiendo mantener la temperatura del reactor dentro de los rangos óptimos establecidos para maximizar la producción de bio-oil y minimizar la generación de residuos (Hafting et al., 2023).

Los ensayos experimentales realizados en reactores de laboratorio han demostrado que los sistemas de control avanzado presentan un mejor desempeño que los controladores convencionales, especialmente frente a perturbaciones externas y variaciones en la calidad de la biomasa. Se ha observado una reducción significativa del error de seguimiento de temperatura, una respuesta más rápida ante cambios de consigna y una mayor eficiencia energética general del sistema. Además, estos estudios resaltan la importancia de la identificación continua de parámetros y la necesidad de contar con sensores confiables para garantizar la efectividad del control. En conclusión, estas investigaciones evidencian que la implementación de estrategias de control avanzado representa una alternativa viable y eficiente para reactores de pirólisis, sentando las bases para futuras aplicaciones a escala industrial (Hafting et al., 2023).

Figura 4. Control Adaptativo en Reactores.



Fuente: <https://nergiza.com/radiacion-conduccion-y-conveccion-tres-formas-de-transferencia-de-calor/>

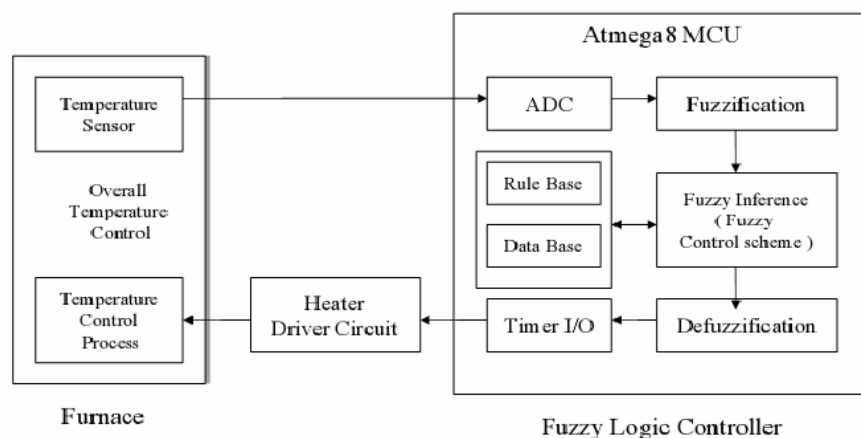
1.6.2. Regulación Térmica con Controladores Difusos

Se han desarrollado investigaciones enfocadas en la regulación térmica mediante controladores difusos, con el objetivo de optimizar la respuesta de sistemas de calefacción sujetos a variaciones y no linealidades en el proceso térmico. El trabajo se centró en diseñar un controlador basado en lógica difusa capaz de interpretar de forma cualitativa las variaciones de temperatura y ajustar la acción de control de manera continua, simulando la toma de decisiones humanas ante fluctuaciones del sistema (Ghasem, 2006). Para ello, se establecieron conjuntos difusos que representaban los estados de temperatura y la acción de control correspondiente, además de un conjunto de reglas de inferencia que permitían determinar la salida adecuada en cada instante. El sistema fue implementado en un entorno de simulación y posteriormente validado en un prototipo físico con sensores de temperatura y actuadores de calentamiento eléctrico (Ghasem, 2006).

Los resultados obtenidos mostraron que el controlador difuso presentaba una respuesta más estable y suave que los controladores PID tradicionales, especialmente en condiciones con alta incertidumbre o no linealidad térmica. Se observó una reducción en el sobreimpulso y en el tiempo de estabilización, lo que se tradujo en una mayor eficiencia energética. La investigación concluyó que la lógica difusa constituye una herramienta efectiva para la regulación térmica en sistemas

donde los modelos matemáticos exactos son difíciles de definir, proponiendo su aplicación en entornos industriales y en el control de reactores térmicos (Ghasem, 2006).

Figura 5. Plano Regulación Térmica con Controladores Difusos.



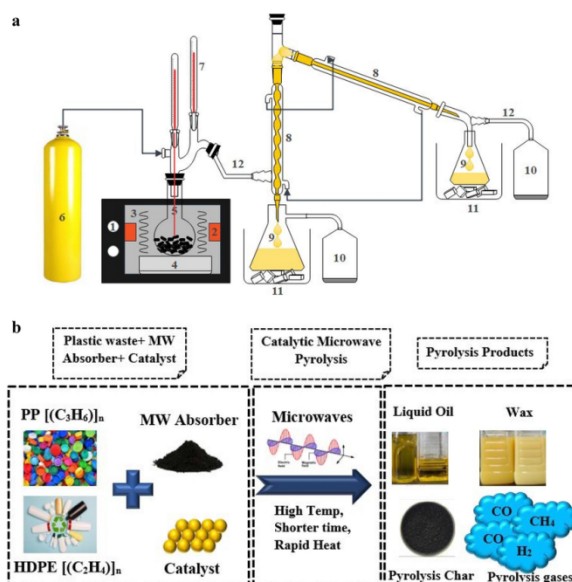
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-fuzzy-logic-temperature-controller_fig1_266891061

1.6.3. Calentamiento por Microondas en Reactores de Pirólisis

En el marco de investigaciones recientes, se ha explorado la aplicación del calentamiento por microondas como técnica de transferencia térmica en reactores de pirólisis con el objetivo de mejorar tanto la eficiencia energética como la tasa de conversión de materiales orgánicos. A diferencia de los métodos de calentamiento tradicional —donde el calor se transmite desde las paredes del reactor hacia el interior del sustrato— en este enfoque se emplea radiación de microondas que induce calentamiento dieléctrico directo en el material o mediante un susceptor adecuado, lo que permite elevadas tasas de calentamiento y tiempos de residencia reducidos (Allende et al., 2023). En estos estudios se desarrollaron prototipos de reactores de laboratorio modificados para microondas, en los cuales se investigaron variables clave como la potencia de microondas, la naturaleza del susceptor, el porcentaje de humedad del material y el tiempo de tratamiento, con el fin de determinar su efecto sobre la temperatura alcanzada, la tasa de calentamiento y la eficiencia térmica del proceso (Allende et al., 2023).

Los resultados arrojaron que el uso del calentamiento por microondas permitió alcanzar rápidamente temperaturas críticas para la pirólisis, mejorando la uniformidad térmica y reduciendo los gradientes de temperatura presentes en reactores convencionales. Asimismo, se observó que la combinación de microondas con un susceptor dieléctrico como carburo de silicio o carbón activado contribuía a evitar puntos fríos en el reactor y mejoraba la transferencia de calor. Se registraron incrementos en el rendimiento de líquidos pirolíticos comparados con valores reportados para pirólisis convencional, y se identificaron los parámetros operativos óptimos dentro del prototipo. Sin embargo, la investigación también señaló desafíos importantes, tales como la escala del reactor, la penetración de las microondas en materiales densos, la gestión adecuada de los susceptores, y la necesidad de validación de largo plazo para la viabilidad industrial (Allende et al., 2023).

Figura 6. Calentamiento por Microondas en Reactores.



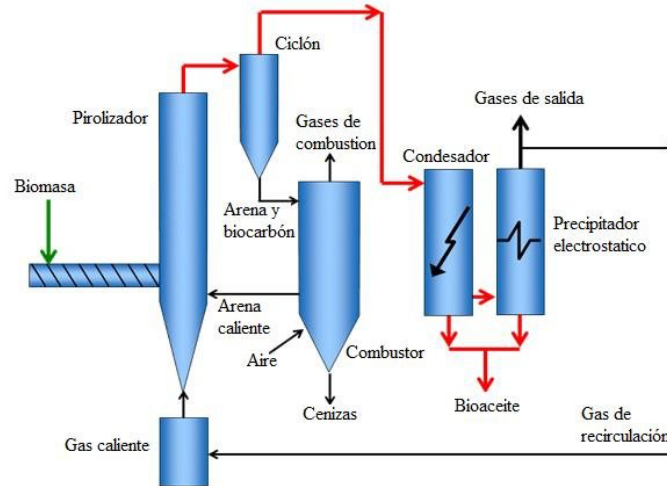
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-of-pyrolysis-setup-1-microwave-reactor-2-waveguide-3-microwaves_fig1_371279388

1.6.4. Caracterización y Diseño de Reactores en Colombia

En trabajos de investigación llevados a cabo en Colombia se aborda la caracterización y el diseño de reactores con aplicación en procesos termoquímicos en el contexto nacional. Estos estudios inician con una caracterización profunda de las materias primas locales como biomasa residual y agroindustrial, para determinar sus propiedades físicas, químicas y térmicas, así como su comportamiento durante la conversión en reactores. A partir de esta caracterización, se establecen los criterios de diseño del reactor incluyendo geometría, régimen de operación térmica, capacidad de alimentación, aislamiento térmico y sistema de extracción de productos, adaptados a las condiciones de operación colombianas. Se realiza la modelación del reactor bajo condiciones realistas de operación, incorporando perfiles de temperatura, transferencia de calor, cinética de reacción y posibles variaciones en la alimentación (Ruiz-Gómez et al., 2022).

La fase experimental contempla la construcción de prototipos a escala laboratorio o piloto, donde se validan los parámetros de diseño establecidos mediante pruebas con biomasa local. Los resultados muestran cómo el reactor diseñado permite alcanzar eficientemente las condiciones térmicas óptimas, reduce desigualdades de temperatura y obtiene productos consistentes. Finalmente, estos trabajos concluyen que el enfoque de caracterización más diseño adaptado es una vía eficaz para el desarrollo de reactores en Colombia, recomendando el escalado a niveles industriales y señalando áreas de mejora como la optimización de sistemas de control térmico, instrumentación y economía de operación (Ruiz-Gómez et al., 2022).

Figura 7. Diseño de Reactores en Colombia.



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-48-Eschema-del-reactor-de-pirólisis-rápida-en-lecho-circulante_fig8_281976634

1.6.5. Control Robusto y Viabilidad Técnica en Pirólisis

En investigaciones orientadas a la implementación de estrategias de control robusto para reactores de pirólisis, se aborda la evaluación de la viabilidad técnica integral de estos sistemas en condiciones de operación variables. El estudio parte de la consideración de que los procesos de pirólisis enfrentan incertidumbres significativas como variaciones en la carga térmica, propiedades de alimentación y condiciones de operación, lo que hace necesario un esquema de control que garantice desempeño tanto ante perturbaciones como ante modelado impreciso. Para ello, se diseñó un controlador robusto encargado de mantener variables clave como temperatura, tiempo de residencia y caudal de alimentación dentro de márgenes preestablecidos incluso bajo condiciones cambiantes (Vargas-Machuca et al., 2023). La fase de viabilidad técnica incluyó el análisis de factores como la escalabilidad del reactor, el consumo energético, la estabilidad térmica, la disponibilidad de materia prima, el mantenimiento y la instrumentación requerida (Vargas-Machuca et al., 2023).

Los resultados indicaron que el enfoque robusto permitió reducir la sensibilidad del sistema a perturbaciones externas, mejorando la repetibilidad del producto de pirólisis y reduciendo el número de paradas no planificadas. Sin embargo, la investigación también señala que la viabilidad técnica a escala industrial aún depende de la optimización de componentes de bajo coste y de la integración de sistemas de monitoreo más avanzados. En conclusión, la combinación de control robusto y evaluación técnica representa una vía prometedora para la implementación de plantas de pirólisis, siempre que se consideren los retos específicos del contexto local (Vargas-Machuca et al., 2023).

Figura 8. Control Robusto y Viabilidad Técnica en Pirólisis.



Fuente: <https://njhchem.com/es/product/stainless-steel-nutsche-filters/200l-industrial-ptfe-pfa-lined-solid-phase-pyrolysis-reactor/>

1.7. MARCO NORMATIVO

Para el desarrollo de este proyecto, se deben tener en cuenta diversas normas técnicas y de seguridad aplicables al diseño de sistemas térmicos, eléctricos y de control:

- **NTC 2050** – Código Eléctrico Colombiano: regula la instalación y operación segura de sistemas eléctricos.
- **ISO 13577-4** – Seguridad de maquinaria para tratamiento térmico industrial.
- **NTC 5665** – Seguridad de máquinas térmicas y de generación de calor.
- **NTC 5613 y NTC 4490** – Normas sobre referenciación y citación de fuentes académicas en Colombia.
- **ISO 13577-4** - Seguridad de Maquinaria para Tratamiento Térmico Industrial.
- **IEC 61131-3** - Lenguajes de Programación para Controladores Lógicos Programables.
- **IEEE 802.11** - Estándares de Comunicación Inalámbrica.
- **Decreto 1076 de 2015** - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- **Resolución 0909 de 2008** - Normas y Estándares de Emisión Admisibles.

Estas normas establecen criterios técnicos y de seguridad que guiarán la selección de materiales, sensores, resistencias, y el diseño del sistema de control térmico, además de garantizar la trazabilidad académica y científica del presente trabajo.

1.8. MARCO METODOLOGICO

Se explica de una forma más completa que enfoque se quiere tomar con la tesis además que tipo de investigación para obtener el resultado deseado.

1.8.1. Enfoque metodológico

El presente proyecto se enmarca en un enfoque de investigación cuantitativo, aplicado y experimental, orientado al diseño, simulación y validación de un sistema de control térmico para un reactor tubular de gasificación de biomasa.

El enfoque cuantitativo se sustenta en la medición y análisis de variables físicas tales como temperatura, potencia, tiempo de respuesta y eficiencia térmica, bajo condiciones controladas y repetibles. A su vez, el carácter aplicado responde a la necesidad de desarrollar una solución tecnológica funcional, fundamentada en principios de automatización industrial y control térmico. Finalmente, el enfoque experimental se evidencia en la verificación del desempeño del sistema a través de simulaciones computacionales que emulan el comportamiento real del proceso térmico, garantizando la validez técnica de los resultados antes de una eventual implementación física.

1.8.2. Tipo de investigación

El trabajo se clasifica como una investigación aplicada de desarrollo tecnológico, centrada en la creación de un sistema automatizado de control térmico basado en instrumentación industrial. Este tipo de investigación busca transferir los principios científicos del control automático y la transferencia de calor a una aplicación concreta, en este caso, el mantenimiento estable de la temperatura en un reactor de gasificación de biomasa.

1.8.3. Diseño metodológico general

Para el desarrollo del sistema de control térmico del reactor de gasificación se estructuró de manera progresiva e integrada, articulando procesos de diseño ingenieril, modelado térmico, simulación y validación del desempeño.

Se realizó la caracterización térmica y el análisis de requerimientos, definiendo las condiciones operativas del reactor, el rango de temperatura (25 °C – 900 °C), los parámetros físicos relevantes como masa del reactor y biomasa, calores específicos, pérdidas por conducción y radiación, así como los criterios de estabilidad y eficiencia energética requeridos.

Ahora, se desarrolló el diseño conceptual del sistema, incluyendo el modelado térmico basado en ecuaciones de transferencia de calor y la simulación energética del proceso. Este modelado permitió representar el comportamiento dinámico del reactor ante variaciones de potencia y perturbaciones externas.

Dado que en esta fase no se contempló la implementación física del prototipo, los procedimientos experimentales se realizaron en entornos de simulación virtual utilizando LOGO!Soft Comfort y MATLAB/Simulink. En LOGO!Soft Comfort se programó la lógica del controlador empleando

módulos analógicos y bloques funcionales de comparación, temporización y modulación PWM. Se configuraron distintos ciclos de trabajo (duty cycle) y periodos de conmutación para analizar su influencia en la estabilidad térmica y la eficiencia energética del sistema.

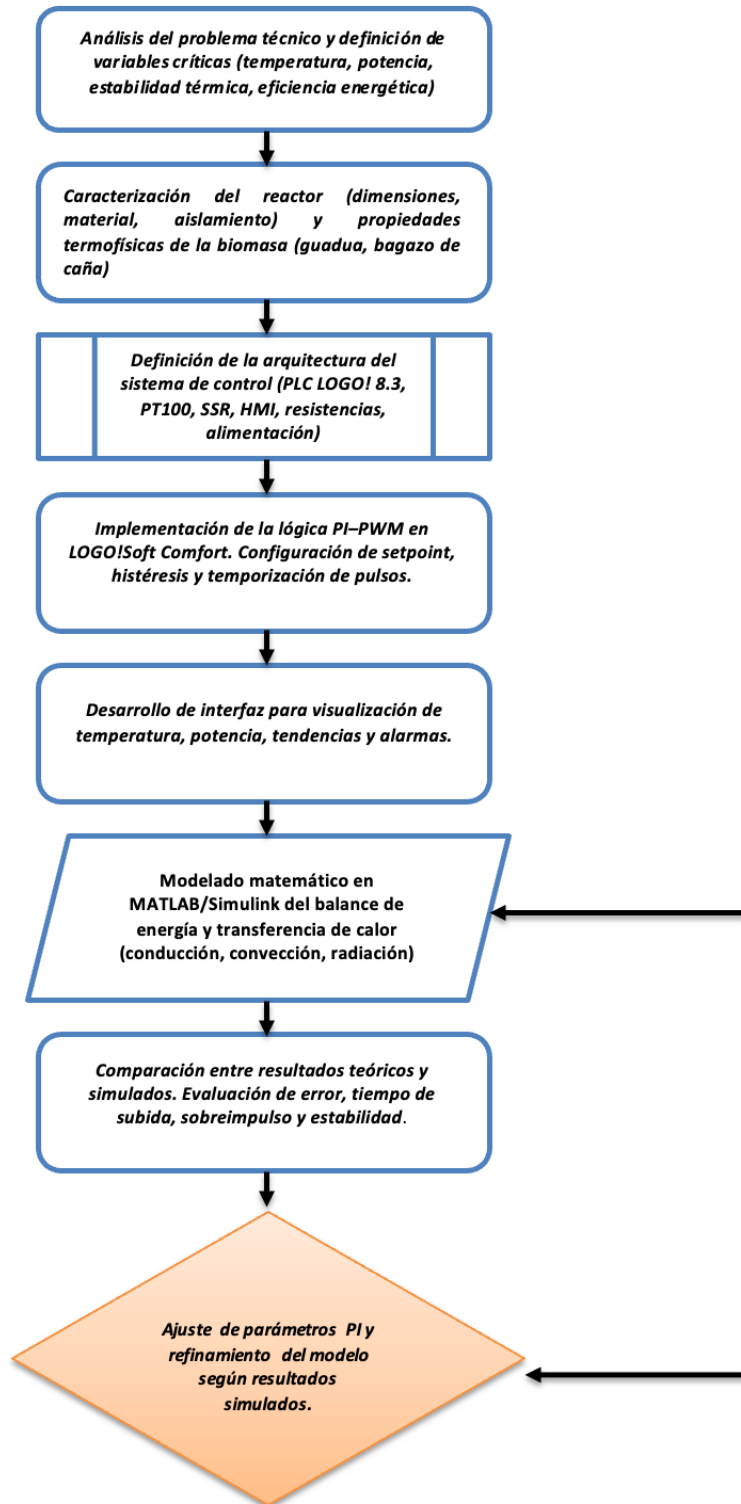
En MATLAB/Simulink se implementó un modelo dinámico del reactor que integra las variables térmicas fundamentales del proceso. Las simulaciones permitieron evaluar la evolución de la temperatura ante cambios de consigna y perturbaciones, verificando la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

El sistema de control propuesto se fundamenta en una arquitectura de lazo cerrado, utilizando una estrategia de modulación por ancho de pulso (PWM) regulada mediante un controlador PI. La señal de temperatura adquirida por el sensor PT100 es procesada en el PLC Siemens LOGO! 8.3, donde se calcula el error entre la temperatura medida y el valor de referencia (setpoint). El algoritmo PI ajusta la señal de salida modulando el tiempo de conducción del relé de estado sólido (SSR), suministrando así una potencia proporcional a la demanda térmica del proceso.

A diferencia del control ON-OFF, la estrategia PI-PWM proporciona mayor estabilidad, reducción del error en estado estacionario y una respuesta continua, lo que resulta especialmente adecuado para procesos térmicos de alta inercia como los reactores de gasificación.

Por último, la validación del sistema se efectuó mediante simulaciones en ambos entornos, empleando criterios de desempeño claramente definidos: error máximo permitido de ± 2 °C respecto al setpoint, tiempo de subida menor a 250 s para alcanzar el 90 % del valor final, sobre impulso máximo del 5 %, tiempo de asentamiento inferior a 500 s, ausencia de oscilaciones sostenidas y eficiencia energética superior al 75 %.

1.8.4. Diagrama de la metodología



Fuente. Elaborada por Autores

2. ANÁLISIS DE CONDICIONES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL REACTOR

El presente capítulo desarrolla un estudio orientado al diseño óptimo de un sistema de calentamiento aplicado a reactores de gasificación de biomasa, tomando como caso de referencia el bagazo de caña y guadua por su alta disponibilidad y poder calorífico. El objetivo principal es establecer los criterios fundamentales que deben considerarse en el proceso de diseño, de manera que el lector cuente con una base conceptual sólida para comprender la importancia del análisis térmico dentro del funcionamiento de un reactor de estas características.

En este sentido, se abordan aspectos clave como la capacidad de procesamiento del reactor, las condiciones térmicas requeridas para garantizar un proceso eficiente y la selección de materiales constructivos adecuados que aporten resistencia mecánica, estabilidad frente a ciclos de calentamiento repetitivos y una adecuada conductividad térmica. Asimismo, se expone la necesidad de alcanzar temperaturas entre los 800 °C a 900 °C de forma controlada y segura, reduciendo pérdidas energéticas y favoreciendo una distribución térmica homogénea.

De manera complementaria, se analiza el caso particular de un reactor de 5.06 litros de volumen, cuyas dimensiones reducidas implican una alta densidad energética y, en consecuencia, un diseño térmico más riguroso. También se enfatiza la importancia de integrar mecanismos de control que permitan regular la temperatura en tiempo real, adaptándose a las dinámicas del proceso de pirólisis y gasificación.

En conclusión, este capítulo sienta las bases para el desarrollo de un sistema de calentamiento robusto y eficiente, capaz de garantizar tanto la integridad estructural del reactor como la producción de un gas de calidad a partir de residuos lignocelulósicos, contribuyendo al mismo tiempo a la optimización energética y a la sostenibilidad del proceso.

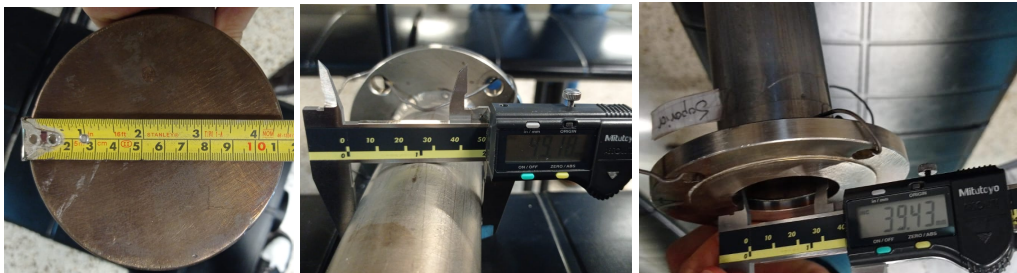
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR EXISTENTE

Se caracterizó el reactor entregado por TransBioEnergy desde el tamaño hasta el material en el que está fabricado.

2.1.1. Dimensiones y material

El reactor en uso presenta una estructura cilíndrica, fabricada en acero inoxidable AISI 304, con una longitud útil de 512,5 mm y un diámetro interno de 111,1 mm como se evidencia en la figura 9. (Dimensiones y medidas reactor) Estas dimensiones permiten un volumen total de 5,067217 litros y un volumen útil equivalente al 50% (2,5336 litros).

Figura 9. Dimensiones y medidas reactor.



Fuente: Foto tomada por Nestor Penagos, 2025.

$$V = \pi r^2 L \quad (2.1)$$

$$V = \pi (5,61 \text{ cm})^2 (51,25 \text{ cm}) = \pi \cdot 31,4721 \cdot 51,25 = 5067,217 \text{ cm}^3$$

$$V = 5067,217 \text{ cm}^3 = 5067,217 \text{ mL} = 5,067217 \text{ L}$$

(Fórmula para hallar volumen)

La relación entre la longitud y el diámetro (L/D) es de 4.6 lo que facilita una adecuada distribución térmica en el interior del reactor, optimizando el proceso de pirolisis.

$$\frac{L}{D} = \frac{512,5}{111,1} = 4,61 \approx 4,6$$

El área superficial interna disponible para la transferencia de calor es de 16 cm².

El acero inoxidable AISI 304 fue seleccionado por su elevada resistencia a la corrosión y buena conductividad térmica (16,2 W/m·K), lo cual es esencial para mantener un entorno térmicamente estable durante el ciclo de calentamiento. Este material permite operar de forma segura hasta temperaturas de 850 °C, manteniendo la integridad estructural del reactor.

Desde el punto de vista mecánico, el espesor de pared del reactor asegura una resistencia adecuada a la presión interna, evitando deformaciones que puedan comprometer la eficiencia térmica. Además, su capacidad para resistir ciclos térmicos intensos garantiza durabilidad operativa sin deterioro prematuro.

2.1.2. Implicaciones térmicas de la geometría del reactor

La geometría del reactor no solo influye en su capacidad de carga, sino también en la eficiencia térmica del proceso. La relación L/D de 4,6 promueve una distribución uniforme del calor, reduciendo los gradientes térmicos axiales y radiales que podrían causar una pirolisis incompleta.

El diseño cilíndrico favorece un patrón de flujo térmico homogéneo, permitiendo que la energía se disipe de manera equilibrada desde las resistencias hacia la biomasa. Este diseño también facilita el

montaje de elementos calefactores de forma equidistante, mejorando la transferencia de calor por conducción a través de acero inoxidable.

Además, la superficie interna del reactor, de 16,0 cm², actúa como medio de intercambio térmico eficiente, aumentando la velocidad de calentamiento de la biomasa. Estas características geométricas reducen el tiempo necesario para alcanzar la temperatura objetivo y, por lo tanto, minimizan el consumo energético total del sistema.

2.2. PROPIEDADES DE LA BIOMASA: BAGAZO DE CAÑA Y RESIDUOS DE GUADUA

Principales Características Físicas de la Biomasa y diferentes materiales que se utilizaran en la gasificadora.

2.2.1. Caracterización física y térmica de la biomasa

En el presente estudio se seleccionaron dos tipos de biomasa lignocelulósica: bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y residuos de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), ambos de amplia disponibilidad en el contexto colombiano. El análisis comparativo de sus propiedades físicas y térmicas permite establecer las condiciones de carga y los requerimientos energéticos del reactor.

2.2.1.1. Bagazo de caña

El bagazo de caña es un subproducto de la industria azucarera, compuesto en gran parte por fibras lignocelulósicas. Presenta una densidad aparente promedio de 150–200 kg/m³ y un contenido de humedad que oscila entre 45 % y 55 % en estado fresco, aunque puede reducirse a 10–15 % mediante secado natural o artificial (Rincón et al., 2018; Cardona et al., 2010). Su calor específico se estima en 1,4–1,8 kJ/kg·°C, con una conductividad térmica cercana a 0,05–0,07 W/m·K (Hernández & Melo, 2016). El poder calorífico inferior (PCI) se ubica entre 7,5 y 9,5 MJ/kg, dependiendo de la humedad residual (Montoya et al., 2019).

2.2.1.2. Residuos de guadua

Los residuos de guadua, utilizados como biomasa complementaria, exhiben una densidad aparente promedio de 300–400 kg/m³ y un contenido de humedad de 8–12 % después de secado (Gutiérrez et al., 2017). Su calor específico se aproxima a 2,2 kJ/kg·°C, con una conductividad térmica de 0,17 W/m·K (Aristizábal et al., 2015). El PCI reportado es de 16–18 MJ/kg, lo cual refleja un potencial energético superior al del bagazo de caña (Vargas et al., 2014).

La masa de biomasa utilizada por batch se estima en 26,95 gramos, lo que representa la mitad del volumen útil del reactor. Estas cantidades han sido determinadas para asegurar una distribución térmica uniforme dentro del reactor, optimizando la eficiencia energética del sistema de calentamiento.

2.2.1.3. Masa de biomasa procesada por lote (*batch*)

En este trabajo se adopta el término *batch* para referirse a la cantidad de biomasa cargada en el reactor por cada ciclo de operación. El volumen útil considerado corresponde al 50 % del volumen total del reactor (2,5336 L).

La masa de biomasa se calcula con la expresión:

$$m = \rho V \quad (2.2)$$

- Para bagazo de caña ($\rho \approx 180 \text{ kg/m}^3$):

$$m = 180 \cdot 0,00025336 = 0,0456 \text{ kg} = 45,6 \text{ g}$$

- Para residuos de guadua ($\rho \approx 300 \text{ kg/m}^3$):

$$m = 300 \cdot 0,00025336 = 0,076 \text{ kg} = 76 \text{ g}$$

Por lo tanto, cada ciclo de operación (*batch*) utiliza aproximadamente 45.6 g de bagazo de caña o 76 g de guadua, según el material seleccionado. Esta definición permite estandarizar los cálculos de energía requerida para el calentamiento inicial y evaluar comparativamente el desempeño del sistema. Las propiedades fisicoquímicas de estos materiales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del bagazo de caña y residuos de guadua

Propiedad	Bagazo de caña	Residuos de guadua
Densidad aparente (kg/m ³)	150-200	300-400
Humedad (%)	10-15 (seco)	8-12 (seco)
Calor específico (kJ/kg·°C)	1,4-1,8	2,2
Conductividad (W/m·K)	0,05-0,07	0,17
PCI (MJ/kg)	7,5-9,5	16-18
Masa por batch (g)	16	27

Fuente. Elaborada por Autores

2.2.2. Requerimientos térmicos para el calentamiento

El objetivo del sistema de calentamiento es elevar la temperatura de la biomasa desde un estado inicial de 25 °C hasta un rango operativo de entre 400 °C y 800 °C. Para calcular la energía requerida, se aplica la ecuación:

$$Q = mC_p\Delta \quad (2.3)$$

Donde:

$m = 0,02695 \text{ kg}$ (masa de biomasa por ciclo, obtenida a partir del volumen útil del reactor y una densidad aparente efectiva del material en condiciones de operación. En este caso, se consideró un volumen útil equivalente al 50 % del volumen total del reactor (2,5336 L), el cual corresponde al espacio realmente ocupado por la biomasa durante el proceso.

Cabe resaltar que la densidad empleada no corresponde a la densidad sólida del material, sino a una densidad aparente que contempla la distribución no compacta de la biomasa dentro del reactor, incluyendo los espacios vacíos, la porosidad del lecho y la heterogeneidad en la disposición de las partículas. Bajo esta consideración, se utilizó un valor efectivo de densidad que permite representar de manera más realista las condiciones operativas del sistema.)

$$C_p = 2200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = (800 - 25)^\circ\text{C} = 775^\circ\text{C}$$

$$Q \approx 0,02695 \text{ kg} \cdot 2200 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \cdot 775^\circ\text{C} \approx 45,9 \text{ kJ}$$

Además, es importante considerar las pérdidas de energía por conducción, convección y radiación. Suponiendo una eficiencia del sistema de calentamiento del 90%, se estima que la potencia requerida para completar el calentamiento en un periodo de 10 minutos (600 segundos) es:

$$P = Q / (t \cdot \eta) \approx 45,9 \text{ kJ} / (600 \text{ s} \cdot 0,9) \approx 85 \text{ W}$$

Este cálculo representa el mínimo teórico necesario. Sin embargo, se recomienda un margen de seguridad, por lo que el diseño final contemplará potencias superiores que compensen variaciones en la humedad, calidad de aislamiento y pérdidas no previstas.

En resumen, el conocimiento detallado de las propiedades físicas y térmicas de la guadua y el bagazo de caña es esencial para dimensionar correctamente el sistema de resistencias y garantizar un proceso térmico eficiente, seguro y repetible en condiciones reales de operación.

2.3. ANÁLISIS TÉRMICO Y ENERGÉTICO DEL PROCESO

Un análisis donde se plantea los requerimientos necesarios para un funcionamiento óptimo a largo plazo.

2.3.1. Requerimientos Energéticos para el Calentamiento

El proceso de gasificación requiere elevar la temperatura desde ambiente (25 °C) hasta 900 °C, implicando un incremento térmico de 875 °C. Para ello, se calcula la energía necesaria para calentar tanto la biomasa de la guadua y el bagazo de caña como el reactor metálico, incluyendo además las pérdidas térmicas propias del sistema.

- Calentamiento de la Biomasa:

La biomasa tiene una masa de 0,02695 kg y un calor específico de 2,2 kJ/kg·°C. Aplicando la ecuación de calor sensible:

$$Q_{\text{biomasa}} = 0,02695 \cdot 2,2 \cdot 875 = 51,88 \text{ kJ}$$

- Calentamiento del Reactor:

El reactor, fabricado en acero inoxidable 304 (0,3076 kg), con un calor específico promedio de 0,5 kJ/kg·°C, requiere:

$$Q_{\text{reactor}} = 0,3076 \cdot 0,5 \cdot 875 = 134,57 \text{ kJ}$$

- Energía Total sin Pérdidas:

$$Q_{\text{total_teórico}} = 51,88 + 134,57 = 186,45 \text{ kJ}$$

- Considerando Eficiencia del 75%:

Debido a pérdidas por conducción, convección y radiación, la energía real requerida se incrementa:

$$Q_{\text{total_real}} = 186,45 / 0,75 = 248,61 \text{ kJ}$$

Lo que equivale a aproximadamente 0,06907 kWh por ciclo de calentamiento.

2.3.2. Distribución Energética del Sistema

El análisis de distribución energética permite identificar los componentes con mayor demanda térmica, útil para optimizar el diseño del sistema.

- **Biomasa:** 20,9% (51,88 kJ)
- **Reactor:** 54,1% (134,57 kJ)
- **Pérdidas térmicas:** 25,0% (62,15 kJ)

Este comportamiento es característico en sistemas de microescala, donde la masa del reactor supera ampliamente la masa de la biomasa. Por lo tanto, el diseño térmico debe centrarse en minimizar las pérdidas y mejorar la eficiencia del calentamiento del reactor.

2.4. SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE MATERIALES

En esta selección se estudiaron diferentes materiales para conseguir el objetivo planteado desde su conductividad hasta el costo aproximado.

2.4.1. Sistema de Aislamiento Térmico

Se evaluaron distintos materiales de aislamiento para proteger térmicamente el reactor de gasificación que opera a 900 °C. Aunque se observa en la tabla 2, las mantas de fibra de vidrio parecen una opción por su bajo costo, estas solo soportan hasta 540 °C, lo cual las hace térmicamente incompatibles con la temperatura operativa. Por tanto, se consideraron otras opciones viables como fibra cerámica, lana mineral y perlita expandida.

Tabla 2. Comparativo de propiedades.

Material	Conductividad (W/m·K)	Temp. Máx. (°C)	Factible a 900 °C	Costo relativo
Fibra de vidrio	0,035	540	No	1,0
Lana mineral	0,040	750	No	2,0
Fibra cerámica	0,026	1260	Sí	4,0
Perlita expandida	0,050	900	Sí	2,0

Fuente. Elaborada por Autores

La fibra cerámica es la opción técnica más robusta con margen de seguridad térmico de +360 °C, mientras que la perlita apenas cumple el límite (900 °C). Tanto la fibra de vidrio como la lana mineral deben descartarse por su déficit térmico (540 °C – 750 °C).

2.4.2. Cálculo de Pérdidas Térmicas

En la tabla 4 se observa que en un primer cálculo con fibra de vidrio (espesor 24,2 mm), como se observa en la tabla 3, las pérdidas térmicas alcanzan 48,4 W, lo cual representa un 70% de la potencia útil del sistema. Se usaron fórmulas de conducción térmica en sistemas cilíndricos considerando la resistencia térmica en la pared del reactor, el aislamiento y la convección externa.

Tabla 3. Pérdidas térmicas por material.

Material	k (W/m·K)	Pérdidas (W)	Eficiencia relativa (%)
Fibra cerámica	0,026	35,9	100,0
Fibra de vidrio	0,035	48,4	74,2
Lana mineral	0,040	55,3	64,9
Perlita expandida	0,050	69,1	52,0

Fuente. Elaborada por Autores

La fibra cerámica logra la menor pérdida térmica (35.9 W) y la mayor eficiencia (100%), mientras que la perlita genera casi el doble de pérdidas térmicas (69.1 W).

Tabla 4. Espesor Requerido para Pérdidas Máximas de 40 W.

Material	Espesor (mm)	Incremento Dimensional	Viabilidad
Fibra cerámica	18,0	-10%	Excelente
Fibra de vidrio	24,2	+21%	Aceptable
Lana mineral	27,7	+38,5%	Limitada
Perlita expandida	34,6	+73%	Problemática

Fuente. Elaborada por Autores

2.4.2.1. Espesor (mm):

El espesor corresponde al grosor del material aislante requerido para cumplir con un mismo nivel de resistencia térmica o de aislamiento. En este caso, los valores varían según la eficiencia térmica de cada material: los materiales más eficientes requieren un menor espesor para lograr el mismo desempeño.

2.4.2.2. Incremento dimensional (%):

El espesor corresponde al grosor del material aislante requerido para cumplir con un mismo nivel de resistencia térmica o de aislamiento. En este caso, los valores varían según la eficiencia térmica de cada material: los materiales más eficientes requieren un menor espesor para lograr el mismo desempeño.

Ejemplo de cálculo para la fibra de vidrio:

$$\text{Incremento}(\%) = \frac{24,2 - 18,0}{18,0} \cdot 100 \approx 21\%$$

De la misma forma se calcularon los porcentajes para los demás materiales.

2.4.2.3. Viabilidad:

La viabilidad se estableció considerando la practicidad del espesor requerido:

- **Excelente:** espesor bajo, fácilmente integrable en aplicaciones industriales.
- **Aceptable:** incremento moderado del espesor, aún viable en la mayoría de los casos.
- **Limitada:** aumento considerable de espesor, lo que puede dificultar la instalación.
- **Problemática:** espesores muy altos, poco prácticos en aplicaciones reales.

El espesor requerido para mantener las pérdidas térmicas bajo control depende directamente del material, viendo la tabla 5 la fibra cerámica es la más compacta y eficiente, mientras que la perlita requiere casi el doble de grosor, generando problemas de diseño.

Tabla 5. Análisis de Resistencias Térmicas.

Material	R _{total} (K/W)	U (W/m ² ·K)	Clasificación térmica
Fibra cerámica	24,4	1,30	Excelente
Fibra de vidrio	18,1	1,75	Buena
Lana mineral	15,8	2,00	Regular
Perlita expandida	12,7	2,50	Deficiente

Fuente. Elaborada por Autores

2.4.2.4. Resistencia térmica (R_{total}, K/W):

La resistencia térmica indica la oposición de un material al paso del calor. Cuanto mayor sea este valor, mejor capacidad de aislamiento presenta el material.

Coeficiente global de transferencia de calor (U, W/m²·K):

Este coeficiente se obtiene a partir del inverso de la resistencia térmica:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

Por lo tanto, materiales con alta resistencia térmica tendrán valores bajos de U, lo que significa que permiten menor transferencia de calor.

Ejemplo de cálculo:

Para la fibra cerámica, con una resistencia térmica de 24,4 K/W:

$$U = \frac{1}{24,4} \approx 1,30 \text{ W/m}$$

De forma similar se realizaron los cálculos para los demás materiales de la tabla.

2.4.2.5. Clasificación térmica:

La clasificación cualitativa (“Excelente”, “Buena”, “Regular” y “Deficiente”) se asignó de acuerdo con los valores obtenidos de R y U.

- Materiales con mayor resistencia y menor U se califican como Excelente.
- Valores intermedios corresponden a Buena o Regular.
- Los materiales con baja resistencia y mayor U se consideran Deficiente.

La resistencia térmica global del sistema es mayor con fibra cerámica, lo cual disminuye el coeficiente global de transferencia de calor (U), mejorando la eficiencia energética.

2.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO

El diseño del sistema de calentamiento eléctrico constituye uno de los pilares tecnológicos más relevantes para el funcionamiento adecuado del reactor de gasificación. Este sistema es responsable de transformar la energía eléctrica en energía térmica de forma controlada, precisa y segura, permitiendo alcanzar las condiciones necesarias para el proceso de pirólisis de la biomasa de guadua.

2.5.1. Importancia del Sistema de Calentamiento

Debido a que la eficiencia y estabilidad térmica son determinantes para la calidad del proceso de gasificación, se requiere un diseño que considere no solo el suministro de energía, sino también la distribución uniforme del calor, la capacidad de respuesta ante variaciones y la seguridad operativa. Por esta razón, el sistema incluye una configuración eléctrica bifásica que reduce pérdidas por efecto Joule, aumenta la eficiencia de transmisión y facilita la integración con sistemas industriales estándar.

2.5.2. Enfoque del Diseño

- El cálculo de la potencia eléctrica considerando márgenes de seguridad operativa.
- La selección de elementos calefactores industriales de alta temperatura.
- La implementación de un sistema de control de temperatura basado en controladores PID con auto sintonía y la incorporación de instrumentación de precisión y monitoreo remoto mediante tecnologías SCADA y HMI.

2.6. BALANCE ENERGÉTICO Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Se analizaron diferentes puntos de vista para obtener un balance idóneo desde su teoría hasta las aplicaciones

2.6.1. Introducción teórica

El balance energético es fundamental en los sistemas de calentamiento, ya que permite determinar la cantidad de energía necesaria para garantizar un proceso eficiente. La transferencia de calor considera las pérdidas que se presentan durante el calentamiento, las cuales dependen de factores como el aislamiento, el material del reactor y las condiciones ambientales. Estas pérdidas pueden ser por conducción, convección y radiación, y afectan directamente el rendimiento térmico del sistema.

2.6.2. Fundamentos físicos

La transferencia de calor implica el estudio de cómo se distribuye la energía en un sistema y cómo esta se transfiere a la biomasa dentro del reactor. Un calentamiento eficiente requiere un diseño adecuado que contemple el tipo de biomasa, su densidad, la capacidad calorífica y el aislamiento térmico del reactor. Además, las propiedades físicas de los materiales y las condiciones de operación influyen en el consumo energético y la estabilidad térmica.

2.6.3. Transferencia de calor en sistemas aislados

En sistemas de aislamiento multicapa, la combinación de materiales con baja conductividad térmica, como la cerámica y la fibra de vidrio, reduce significativamente las pérdidas de calor. El diseño estructural del aislamiento garantiza que la mayor parte de la energía generada se transfiera directamente al interior del reactor, mejorando la eficiencia general del proceso.

2.6.4. Aplicaciones industriales

Los sistemas de calentamiento y control térmico son ampliamente utilizados en la industria energética y de procesos. En reactores de gasificación y pirolisis, un control preciso de la temperatura permite maximizar la generación de gas metano y la eficiencia de conversión de la biomasa. Por lo tanto, el análisis térmico es un aspecto esencial en el diseño de cualquier sistema de calentamiento industrial.

2.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FINALES DEL SISTEMA

Se estudiaron diferentes formas y tipo de materiales que podemos utilizar en la resistencia hasta encontrar la definitiva que en este caso fue helicoidal y Acero Inos 304 del mismo material que el reactor.

2.7.1. Tipo de resistencia

Teniendo en cuenta estos fundamentos, existen diversas configuraciones de resistencias eléctricas empleadas en sistemas de calentamiento industrial. Entre las más comunes se encuentran las resistencias tubulares, las resistencias tipo banda o abrazadera, y las resistencias de alambre enrollado, cada una con características particulares dependiendo de la aplicación térmica y la geometría del sistema a calentar.

Las resistencias tubulares son ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales debido a su robustez mecánica y buena capacidad de transferencia de calor. Sin embargo, su implementación en reactores cilíndricos suele requerir múltiples elementos distribuidos a lo largo de la superficie, lo que puede aumentar la complejidad del montaje y dificultar una distribución térmica completamente uniforme.

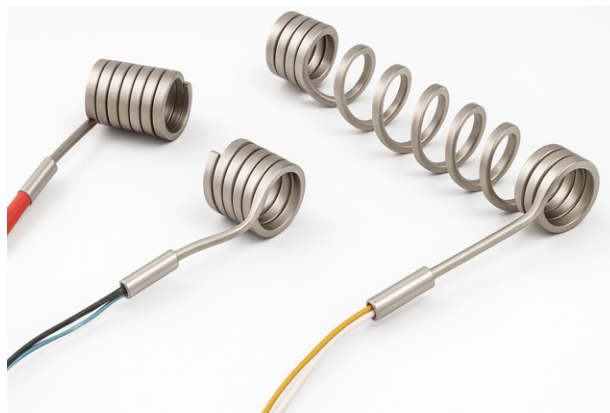
Por otra parte, las resistencias tipo banda se emplean comúnmente en el calentamiento de superficies cilíndricas, como en extrusoras o tanques. Aunque ofrecen una buena transferencia de calor por contacto directo con la superficie metálica, su fabricación generalmente está limitada a diámetros específicos, lo que puede restringir su adaptabilidad cuando se trata de prototipos o sistemas de geometría variable como el reactor utilizado en este proyecto.

Asimismo, las resistencias de alambre enrollado sobre soportes cerámicos constituyen otra alternativa utilizada en hornos y sistemas de calentamiento de alta temperatura. Este tipo de resistencias permite alcanzar temperaturas elevadas y facilita la disipación del calor hacia el entorno del reactor. No obstante, su implementación suele requerir estructuras adicionales de soporte y aislamiento térmico, lo que incrementa la complejidad constructiva del sistema.

Teniendo en cuenta estas alternativas y las características geométricas del reactor de la gasificadora, una de las configuraciones más adecuadas corresponde a una resistencia de tipo helicoidal, tal como se muestra en la Figura 10. Este tipo de resistencia consiste en un conductor resistivo dispuesto en forma de espiral que puede rodear la superficie externa del reactor, permitiendo una distribución más homogénea del flujo térmico a lo largo de la superficie cilíndrica. Además, su geometría facilita la adaptación a la forma del reactor, permitiendo un calentamiento progresivo, uniforme y controlado, lo cual resulta fundamental para garantizar la estabilidad térmica requerida durante el proceso de gasificación de la biomasa.

En consecuencia, considerando los criterios de distribución térmica, adaptabilidad geométrica, simplicidad de instalación y control de temperatura, se selecciona la resistencia helicoidal como la alternativa más adecuada para el sistema de calentamiento del reactor propuesto.

Figura 10: Resistencia Helicoidal en Acero Inox.



Fuente: <https://www.resistencias.es/resistencias-helicoidales-conformables/>

2.7.2. Material de la Resistencia

En este caso, se propone que el elemento calefactor sea fabricado en acero inoxidable AISI 304, al igual que el material utilizado en la construcción del reactor. De acuerdo con las propiedades térmicas presentadas en la Tabla 7, este material posee una capacidad de operación a temperaturas elevadas que puede alcanzar aproximadamente entre 870°C y 925°C antes de comenzar a presentar pérdida significativa de sus propiedades mecánicas. Además, el acero inoxidable AISI 304 presenta una buena resistencia a los choques térmicos y a los ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento, lo que lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones donde se requiere un funcionamiento continuo o repetitivo del sistema de calentamiento.

El hecho de que tanto el reactor como el elemento calefactor estén fabricados en el mismo tipo de material también favorece la compatibilidad térmica y mecánica del sistema, ya que reduce los efectos asociados a diferencias en coeficientes de expansión térmica entre materiales distintos. Esto contribuye a mantener una transferencia de calor más estable hacia la pared del reactor y disminuye posibles esfuerzos mecánicos generados por dilataciones diferenciales durante la operación del sistema.

Por otro lado, si el sistema requiriera operar a temperaturas superiores al rango objetivo del reactor (aproximadamente 900°C), se recomienda considerar el uso de acero inoxidable AISI 310 para el elemento calefactor. Según las propiedades térmicas indicadas en la Tabla 6, este material presenta una mayor resistencia a altas temperaturas, pudiendo operar de forma estable hasta aproximadamente 1100°C – 1150°C, manteniendo una adecuada resistencia mecánica y estructural en condiciones de operación térmica exigentes.

En consecuencia, para las condiciones de operación establecidas en este proyecto, el acero inoxidable AISI 304 constituye una opción adecuada y compatible con el diseño del reactor; sin embargo, en aplicaciones donde se requiera ampliar el rango de temperatura de operación, el acero inoxidable AISI 310 representa una alternativa más robusta desde el punto de vista térmico, manteniendo ventajas similares en términos de resistencia a la oxidación y estabilidad estructural a altas temperaturas.

Tabla 6: Propiedades Térmicas del Acero AISI310

FORJADO	RECOCIDO		DUREZA BRINELL BARRAS RECOCIDAS (1)	TEMPLE
	TEMPERATURA	MEDIO DE ENF.		
1095-1200 No forjar abajo de 950 °C enfriar rápidamente	1040-1150	enfriar rápidamente hasta temperatura ambiente	185	Endurecible solo por trabajo mecánico

Fuente: Ficha Técnica Acero Inoxidable 310, por Cía. General de Aceros (CGA), 2024.

Tabla 7: Propiedades Térmicas del Acero AISI304

FORJADO	RECOCIDO		DUREZA BRINELL BARRAS RECOCIDAS (1)	TEMPLE
	TEMPERATURA	MEDIO DE ENF.		
1150-1200 °C No forjar abajo de 900 °C enfriar rápidamente	1010-1120	enfriar rápidamente hasta temperatura ambiente	160	Endurecible solo por trabajo mecánico

Fuente: Ficha Técnica Acero Inoxidable 304-304L, por Cía. General de Aceros (CGA), 2024.

2.7.3. Alimentación eléctrica

El sistema se diseñará para ser alimentado con energía trifásica a 220 VAC, ya que esta configuración permite un mejor equilibrio de carga y una distribución uniforme de la energía, reduciendo las pérdidas eléctricas y mejorando la confiabilidad operativa.

2.7.4. Valor Eléctrico de la Resistencia

Para este dimensionamiento se consideran los siguientes parámetros:

- Sistema trifásico AC
- Tensión línea-línea: 400 V aprox.
- Frecuencia 60hz
- Carga: Resistiva Pura

La potencia de fase se calculó de la siguiente forma

$$P_{Total} = V_{Fase} I_{Fase} 3 \cos(\phi) \quad (2.4)$$

Fuente: Boylestad, R. L. (2011). Introducción al análisis de circuitos (12.ª ed.).

En este caso la corriente se asume (5A por fase) teniendo en cuenta el ideal de llegar a la temperatura deseada lo más rápido posible, el Voltaje por fase es de 220Vac y como se manejan cargas puramente resistivas asumimos $\cos(\emptyset)$ como 1, esto nos da una potencia total de:

$$P_{Total} = 220Vac \cdot 5A \cdot 3 \cdot 1$$

$$P_{Total} = 3300W$$

$$P_{Total} = 3,3kW$$

Teniendo en cuenta estos valores se calcula el valor deseable de la resistencia con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_{Fase}}{I_{Fase}} \quad (2.5)$$

$$R = \frac{220Vac}{5A}$$

$$R = 44\Omega$$

Con los siguientes resultados, decimos que la resistencia deberá soportar una potencia de alrededor 3.3kW teniendo valor resistivo de 44Ω.

2.7.5. Sistema de control

Para garantizar la estabilidad térmica y la seguridad del proceso, se integrará un sistema de control PI digital, junto con un sensor de temperatura tipo termopar K, capaz de operar a temperaturas de hasta 1200°C. Opcionalmente, se podrá implementar un panel HMI para monitoreo y ajuste de parámetros de operación en tiempo real.

2.7.6. Protecciones y seguridad eléctrica

El sistema contará con protecciones como disyuntores trifásicos, contactores térmicos y fusibles de respuesta rápida, además de utilizar cableado y terminales adecuados para soportar altas temperaturas, garantizando así la seguridad del operador y la integridad de los componentes.

3. CARACTERIZACIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA EN PLC SIEMENS LOGO! 8.3

El sistema de control implementado tiene como propósito regular la temperatura interna del reactor tubular de gasificación, garantizando estabilidad térmica durante la operación y evitando sobrecalentamientos que puedan comprometer la integridad del material o la eficiencia del proceso.

El diseño se basa en un controlador proporcional–integral (PI) con modulación por ancho de pulso (PWM), programado en el entorno LOGO!Soft Comfort y ejecutado sobre un PLC Siemens LOGO! 8.3. Este controlador fue seleccionado debido a su capacidad de implementar funciones de control proporcional–integral mediante bloques funcionales disponibles en el entorno de programación, así como por su compatibilidad con módulos de entrada analógica para sensores de temperatura industriales. Adicionalmente, presenta ventajas en términos de facilidad de programación, confiabilidad industrial y disponibilidad en entornos educativos e industriales, lo que lo convierte en una solución adecuada para sistemas de control térmico de pequeña y mediana escala.

Con el fin de justificar esta selección tecnológica, se realizó una comparación entre el PLC Siemens LOGO! 8.3 y un PLC industrial de mayor capacidad, evaluando criterios como complejidad del sistema, facilidad de programación, requerimientos del proyecto y costo de implementación. Como se muestra en la Tabla 8, el PLC LOGO! 8.3 cumple adecuadamente con los requerimientos del sistema de control propuesto sin introducir complejidad innecesaria asociada a controladores de mayor capacidad.

El sistema utiliza sensores industriales SITRANS para la medición de temperatura, una etapa de potencia basada en MOSFET y un lazo de control cerrado con realimentación directa desde la temperatura medida. La etapa de potencia fue seleccionada debido a su capacidad para conmutar señales PWM con alta eficiencia y baja disipación de potencia, permitiendo modular de forma precisa la energía entregada al elemento calefactor.

De manera similar, se realizó un análisis comparativo entre diferentes tecnologías de conmutación utilizadas en control térmico, tales como relés electromecánicos, dispositivos basados en TRIAC y transistores de potencia. Como se observa en la Tabla 9, la utilización de MOSFET permite implementar un control continuo de la potencia aplicada, mejorando la estabilidad del proceso térmico y reduciendo esfuerzos térmicos sobre los componentes del sistema.

Tabla 8. Comparación entre PLC Siemens LOGO! 8.3 y PLC industrial genérico.

Criterio	PLC Siemens LOGO! 8.3	PLC industrial genérico (ej. Siemens S7-1200)
Complejidad del sistema	Adecuado para aplicaciones de pequeña y mediana escala	Diseñado para sistemas de automatización más complejos
Implementación de control PI	Disponible mediante bloques funcionales en LOGO!Soft Comfort	Requiere programación más avanzada en TIA Portal
Facilidad de programación	Interfaz gráfica sencilla y rápida implementación	Programación más estructurada y compleja
Costo del sistema	Bajo costo y alta disponibilidad	Mayor costo de hardware y software
Requerimientos del proyecto	Cumple completamente las necesidades del control térmico del reactor	Capacidades superiores a las requeridas para este sistema
Aplicación en prototipos académicos	Muy utilizado en entornos educativos y prototipos	Más orientado a aplicaciones industriales de gran escala

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 9. Comparación entre PLC Siemens LOGO! 8.3 y PLC industrial genérico.

Criterio	MOSFET	Relé electromecánico	TRIAC / SSR
Tipo de control	Permite modulación PWM precisa	Solo control ON-OFF	Control de potencia en AC
Velocidad de conmutación	Muy alta	Baja	Media
Desgaste mecánico	No presenta desgaste mecánico	Alto desgaste por conmutación	Bajo
Eficiencia energética	Alta eficiencia y baja disipación	Pérdidas por conmutación	Eficiencia media
Control de potencia térmica	Permite regulación continua	Solo encendido/apagado	Regulación limitada
Aplicación en este proyecto	Adecuado para control PWM del sistema térmico	No permite modulación de potencia	Requiere control específico de fase

Fuente: Elaboración Propia.

3.1 Arquitectura general del sistema de control

La Figura 11 presenta el esquema funcional del sistema de control implementado. En él se identifican claramente las entradas, el elemento de procesamiento y las salidas del sistema.

Entradas:

- Sensor de temperatura del núcleo (variable controlada).
- Sensor de temperatura de pared (variable de supervisión).
- Setpoint definido desde la interfaz HMI.

Elemento de procesamiento:

- PLC Siemens LOGO! 8.3 con módulo analógico AM2 RTD.

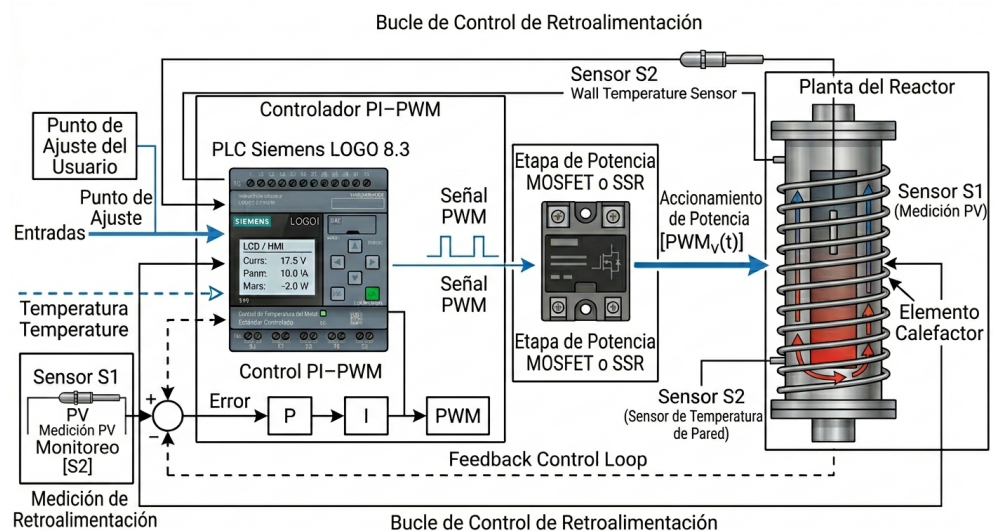
Salida:

- Señal PWM hacia la etapa de potencia (MOSFET/SSR).

Potencia eléctrica modulada hacia la resistencia calefactora.

El sistema opera en lazo cerrado, donde la señal medida del sensor principal es comparada con el setpoint térmico, generando una acción de control proporcional–integral que regula el ciclo útil del PWM aplicado a la etapa de potencia.

Figura 11. Esquema funcional de control



Fuente: Elaboración Propia.

Con el fin de describir los elementos que conforman el sistema de control implementado, la Tabla 10 presenta los componentes principales del sistema, incluyendo los dispositivos de sensado, procesamiento y actuación. Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del lazo de control térmico del reactor, permitiendo medir la temperatura del proceso, ejecutar el algoritmo de control y modular la potencia aplicada al elemento calefactor.

Tabla 10. Componentes principales del sistema.

Componente	Modelo / Tipo	Ubicación o función	Descripción
Sensor de temperatura del núcleo	SITRANS TS500 (RTD / tipo K configurable)	Núcleo del reactor	Mide la temperatura del lecho de biomasa. Es la variable principal del control.
Sensor de temperatura de pared	SITRANS TS300 (termopar tipo K)	Pared externa del reactor	Se considera como variable de supervisión para futuras etapas del proyecto.
PLC Siemens LOGO! 8.3	CPU principal con módulo AM2 RTD	Tablero de control	Procesa la señal analógica del sensor y ejecuta el control PI-PWM.
Etapas de potencia	MOSFET / SSR	Interfaz entre salida del PLC y resistencia calefactora	Modula la potencia aplicada según el ciclo útil PWM.
Resistencia calefactora	125 V DC / 230 V AC	Integrada en la camisa térmica del reactor.	Elemento calefactor controlado para alcanzar el setpoint térmico.

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.1. Criterios de selección de componentes

La selección de los componentes del sistema se realizó considerando criterios técnicos de precisión, robustez industrial, compatibilidad eléctrica y disponibilidad comercial.

Sensor SITRANS TS500 (núcleo): seleccionado por su precisión en rangos elevados de temperatura y compatibilidad con entradas RTD del módulo AM2.

Sensor SITRANS TS300 (pared): empleado como variable de supervisión térmica para monitoreo estructural.

PLC Siemens LOGO! 8.3: elegido por su disponibilidad, capacidad de control PI integrada y facilidad de programación.

Etapa de potencia MOSFET/SSR: seleccionada por permitir modulación PWM con baja disipación térmica y alta velocidad de conmutación.

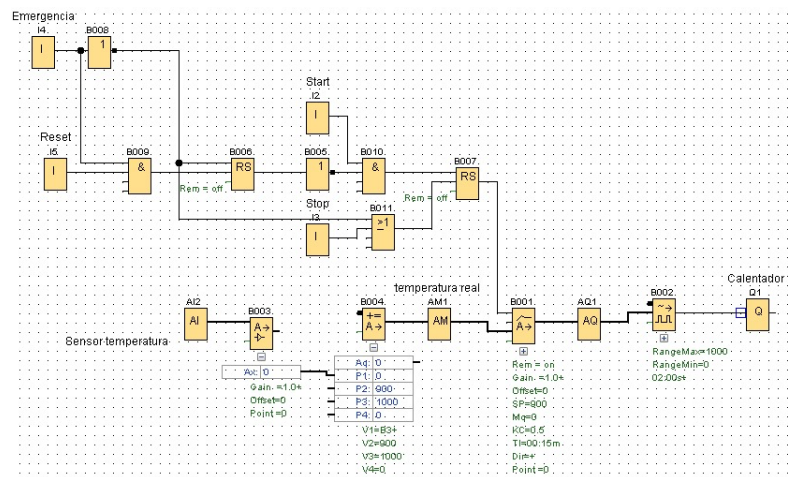
Resistencia calefactora: dimensionada según los cálculos térmicos del reactor.

3.1.2. Descripción del programa en LOGO!Soft ComfortD

Como se observa en la Figura 12, la lógica de control desarrollada en LOGO!Soft Comfort se representa mediante un diagrama de bloques que integra la lectura de la señal analógica del sensor, su escalado a unidades físicas de temperatura, el cálculo de la acción de control PI y la generación de la señal PWM para el accionamiento del calentador.

El diagrama mostrado en la Figura 12 refleja la secuencia funcional del programa implementado en el PLC, permitiendo visualizar de manera clara la relación entre la adquisición de la variable de proceso, el tratamiento de la señal y la regulación de la potencia suministrada al sistema de calentamiento. Esta estructura facilita la comprensión del funcionamiento general del control y su integración dentro del entorno de programación utilizado.

Figura 12. Lógica del control de temperatura en LOGO!Soft Comfort.



Fuente: Elaboración Propia.

3.1.3. Funcionamiento de la lógica de control

El funcionamiento general del sistema de control se desarrolla a partir de una secuencia de etapas que permiten adquirir la señal de temperatura, acondicionarla, procesarla mediante la acción de control PI y generar la señal de modulación correspondiente para el accionamiento del calentador. Como se muestra en la Figura 12, esta lógica fue implementada en LOGO!Soft Comfort mediante bloques funcionales interconectados que representan el flujo completo de la variable de proceso dentro del sistema.

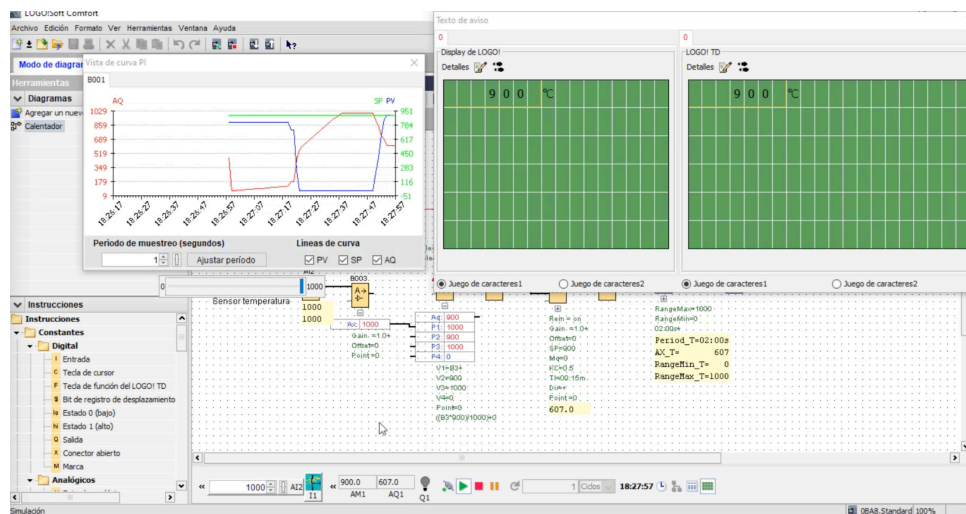
En primer lugar, se realiza la adquisición de la señal, donde el bloque AI2 recibe la entrada analógica proveniente del sensor SITRANS TS500. Posteriormente, esta señal es ajustada mediante el bloque B003 (Amplificador), el cual permite escalar la señal de 0–10 V al rango correspondiente de temperatura de 0–1000 °C, con el fin de trabajar con la variable en unidades físicas dentro del entorno de control.

A continuación, se lleva a cabo el cálculo del control PI mediante el bloque B001 (Controlador PI), encargado de procesar el error existente entre la temperatura real y el valor de referencia definido para el sistema ($SP = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los parámetros teóricos del controlador fueron ajustados de acuerdo con el modelo térmico del reactor, considerando su capacidad calorífica y su tiempo de respuesta, con el propósito de obtener una respuesta estable y adecuada frente a la dinámica térmica del proceso.

Posteriormente, se realiza la generación de la señal PWM a través del bloque AQ1, el cual produce una señal modulada proporcional al valor calculado por el controlador PI. Esta señal opera con una frecuencia determinada por la ventana de muestreo, aproximadamente de 1 s, y se aplica a la salida Q1, encargada de controlar la compuerta del MOSFET, regulando de esta manera la potencia de calentamiento suministrada al sistema.

Finalmente, el accionamiento del calefactor se ejecuta mediante la salida Q1, que actúa como salida digital de conmutación de la resistencia calefactora, entregando pulsos de energía controlados de acuerdo con la demanda térmica del reactor. Como se aprecia en la Figura 13, esta estrategia de control permite mantener la temperatura cercana al valor de consigna, favoreciendo una respuesta térmica estable durante la operación del sistema.

Figura 13. Gráfica de la respuesta térmica del sistema en simulación.



Fuente: Elaboración Propia.

3.1.4. Parámetros de control utilizados

Los parámetros empleados en el bloque PI y los valores de calibración del sistema se obtuvieron mediante cálculos teóricos y pruebas de simulación como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de control utilizados.

Parámetro	Símbolo	Valor configurado	Descripción
Setpoint de temperatura	Tset	900 °C	Temperatura deseada del núcleo.
Ganancia proporcional	Kp	0,5	Determina la velocidad de respuesta al error térmico.
Tiempo integral	Ti	0,15 min	Compensa errores acumulados en estado estacionario.
Ventana PWM	—	1 s	Periodo de conmutación de la señal PWM.
Rango de salida	—	0–100 %	Control del ciclo útil aplicado al MOSFET.

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.5. Justificación del uso de una única salida

Durante el desarrollo del sistema se consideró inicialmente la posibilidad de emplear dos salidas PWM para manejar de manera independiente la resistencia del núcleo y una resistencia secundaria en la pared del reactor.

Sin embargo, debido a limitaciones del entorno de simulación y a que el propósito de esta fase era validar el comportamiento térmico principal, se optó por una única salida de control (Q1).

Esta decisión no afecta la funcionalidad del sistema, ya que:

- La mayor dinámica térmica se encuentra en el núcleo, donde se ubica el sensor principal.
- El control de la pared puede implementarse como un lazo de seguridad pasivo, sin requerir salida independiente.
- El diseño de hardware y la programación del LOGO! permiten ampliar fácilmente el control a una segunda salida si se desea realizar una compensación térmica futura.

Por tanto, se justifica mantener una única salida PWM activa en esta etapa, priorizando la validación del algoritmo PI y la estabilidad térmica del reactor, dejando preparada la arquitectura para futuras expansiones.

3.1.6. Justificación del uso del control PI–PWM frente al control ON–OFF

Aunque los sistemas de calentamiento suelen emplear controladores ON–OFF por simplicidad, este tipo de control presenta oscilaciones amplias y tiempos de respuesta elevados, inadecuados para procesos térmicos de alta precisión.

Tabla 12. Comparativo sistema ON–OFF y control PI–PWM.

Criterio	Control ON–OFF	Control PI–PWM
Estabilidad térmica	Oscilaciones amplias (± 5 – 10 °C).	Error menor a ± 2 °C.
Tiempo de respuesta	Elevado (retardo por inercia térmica).	Rápido, con acción continua.
Eficiencia energética	Encendidos totales frecuentes.	Modulación proporcional de potencia.
Desgaste eléctrico	Alta fatiga por conmutaciones.	Conmutación suave y controlada.
Aplicabilidad industrial	Procesos simples.	Procesos de alta inercia y precisión.

Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la tabla 12, el esquema PI–PWM se considera óptimo para controlar el proceso térmico del reactor de gasificación, garantizando estabilidad, eficiencia y durabilidad del sistema.

Adicionalmente, se evaluó el uso de un controlador proporcional–integral–derivativo (PID). Sin embargo, debido a la naturaleza térmica del proceso, se determinó que la acción derivativa no aporta mejoras significativas en el desempeño del control.

Los sistemas térmicos presentan alta inercia y dinámicas lentas, donde la variación de temperatura ocurre de manera progresiva y sin cambios bruscos. En este tipo de procesos, el término derivativo —cuyo propósito es anticipar variaciones rápidas del error— pierde efectividad, ya que dichas variaciones no son predominantes en el comportamiento del sistema. Por el contrario, su implementación puede amplificar el ruido proveniente de los sensores de temperatura, generando oscilaciones indeseadas en la señal de control y posibles esfuerzos innecesarios en los elementos de potencia.

Adicionalmente, en procesos de pirólisis donde el objetivo es alcanzar y mantener una temperatura dentro de un rango operativo estable, la acción proporcional–integral resulta suficiente para garantizar una respuesta adecuada. El término proporcional permite reaccionar ante desviaciones de temperatura, mientras que el término integral elimina el error en estado estacionario, asegurando que el sistema alcance el setpoint deseado. En este contexto, la inclusión del término derivativo no mejora de manera significativa el tiempo de establecimiento y puede incluso comprometer la estabilidad debido a la sensibilidad al ruido.

Por otra parte, la combinación del controlador PI con una estrategia de modulación por ancho de pulso (PWM) permite ajustar de forma continua la potencia suministrada al sistema de calefacción, logrando un control más fino y una respuesta efectiva frente a perturbaciones, sin necesidad de recurrir a la acción derivativa. Esto resulta especialmente adecuado en sistemas térmicos donde la rapidez extrema de respuesta no es el objetivo principal, sino la estabilidad y uniformidad del perfil de temperatura.

En consecuencia, el esquema PI–PWM representa la mejor relación entre estabilidad, robustez frente al ruido, eficiencia en el control térmico y facilidad de implementación en el sistema propuesto.

3.2. Plano de conexión

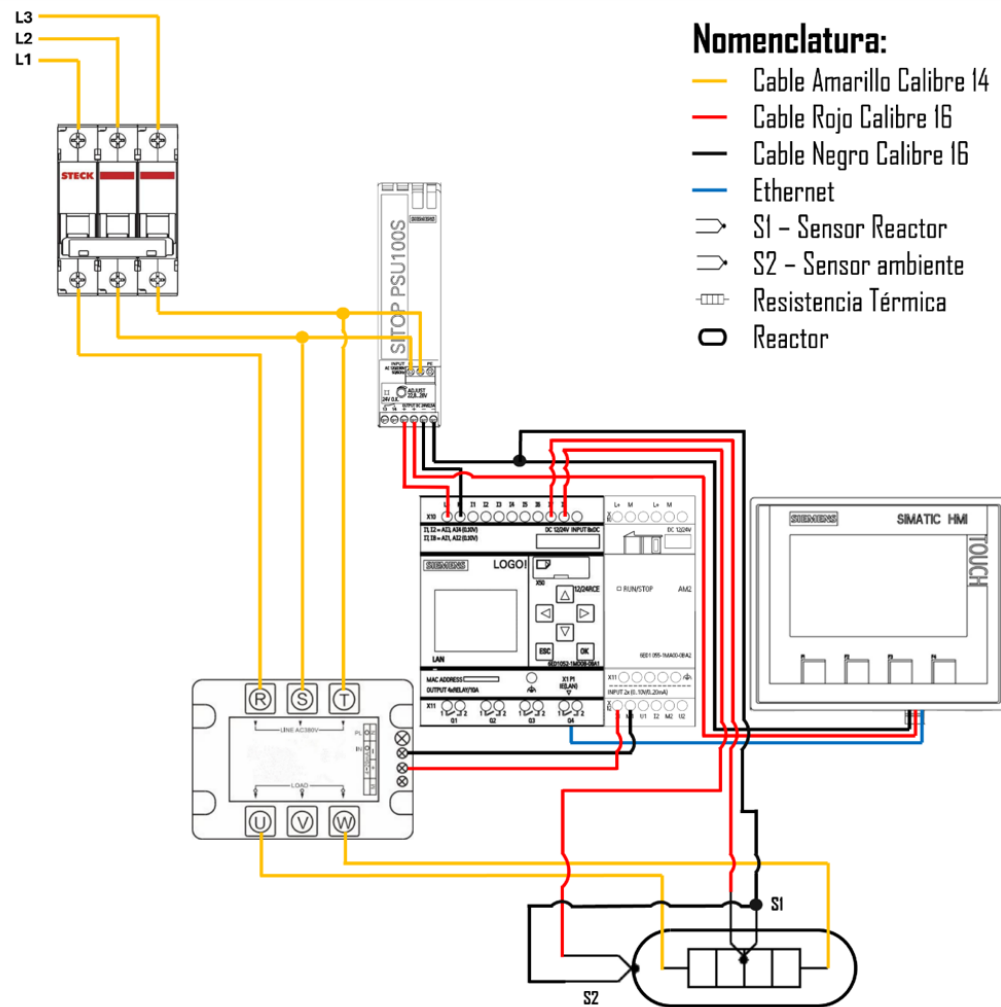
El plano de conexión del sistema permite representar de manera integral la arquitectura eléctrica y funcional del control de temperatura propuesto para el reactor de la gasificadora. A través de este esquema es posible identificar la interconexión entre los elementos de alimentación, potencia, adquisición de señales, control y visualización, lo cual facilita la comprensión global del sistema y su implementación. En esta sección se describe la forma en que se relacionan los principales componentes eléctricos y electrónicos que intervienen en el proceso de control térmico.

3.2.1. Plano de Conexión General

Con el fin de visualizar de manera integral la arquitectura eléctrica del sistema de calentamiento propuesto para el reactor de la gasificadora, se presenta el diagrama pictórico eléctrico del sistema, el cual permite identificar de forma clara la interconexión entre los diferentes componentes que conforman las etapas de potencia, control y monitoreo. Como se observa en la Figura 14 y en la Tabla 13, el sistema se compone de una alimentación trifásica que suministra energía tanto al controlador de potencia encargado de regular la energía suministrada a la resistencia térmica del reactor como a la fuente de alimentación que proporciona la tensión de operación para los dispositivos de control.

El control del proceso se realiza mediante un PLC Siemens LOGO! 8.3, el cual recibe la información proveniente de los sensores de temperatura instalados en el reactor y en el ambiente, permitiendo supervisar de manera continua las condiciones térmicas del sistema. A su vez, el PLC se comunica con una interfaz hombre–máquina (HMI) que permite al operador monitorear las variables del proceso y efectuar ajustes en los parámetros de control. De esta manera, el diagrama pictórico facilita la comprensión del funcionamiento general del sistema y de la interacción existente entre sus diferentes subsistemas.

Figura 14. Plano conexiones.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13. Componentes Sensitivos, Eléctricos y Control del Diagrama eléctrico.

Componente	Modelo / Tipo	Ubicación o función	Descripción
Sensor de temperatura del núcleo	SITRANS TS500 (RTD / tipo K configurable)	Núcleo del reactor	Mide la temperatura del lecho de biomasa. Es la variable principal del control.
Sensor de temperatura de pared	SITRANS TS300 (termopar tipo K)	Pared externa del reactor	Se considera como variable de supervisión para futuras etapas del proyecto.
PLC Siemens LOGO! 8.3	CPU principal con módulo AM2 RTD	Tablero de control	Procesa la señal analógica del sensor y ejecuta el control PI–PWM.
Módulo de Extensión	AM2 LOGO!	Tablero de Control	Permite la salida de la Señal análoga del PLC Logo
HMI	KTP400 Basic	Tablero de Control	Permite una visualización más clara y limpia del funcionamiento
Fuente de alimentación 24VDC	SITOP PSU100S	Tablero de Control	Una fuente que sirve para alimentar el PLC, la extensión y el HMI
SCR Control de Potencia trifásico	SCR	Interfaz entre salida del PLC y resistencia calefactora	Modula la potencia aplicada según el ciclo útil PWM.
Resistencia Termica	125 V DC / 230 V AC	En el interior del reactor	Elemento calefactor controlado para alcanzar el setpoint térmico.
Breaker trifásico 20A	Breaker STECK-20A Trifásico	Seguro eléctrico del circuito	Seguro eléctrico por si se presenta un corto el cual sobrepase el amperaje del breaker.

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Descripción del Plano de conexión

El diagrama de la Figura 12 presenta la arquitectura del control de temperatura, utilizando un controlador lógico programable (PLC) Siemens LOGO! 8 como unidad de control principal y una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) SIMATIC TOUCH KTP400 BASIC para la visualización y operación. El sistema implementa un lazo de control modulado para la potencia de calentamiento mediante el uso de un SCR.

3.2.3. Sistema de Alimentación y Potencia

El sistema opera con una alimentación Trifásica (3 Fases).

3.2.3.1. Potencia Principal (AC 220V):

- La alimentación trifásica (L1, L2, L3) a 220V AC es protegida por un elemento de conmutación STECK (Contactor o Interruptor Automático).
- La tensión se aplica a las entradas de línea (R), (S), (T) del módulo SCR Power Controller (Rectificador Controlado de Silicio).
- La carga (Reactor/Resistencia Térmica) se conecta en configuración tipo estrella sin neutro a las salidas (U), (V), (W) del módulo SCR.
- **Calibre:** La línea de potencia principal utiliza Cable Amarillo Calibre 14. Ya que este calibre es capaz de soportar hasta 15A, Mientras las otras conexiones utilizan Cable Negro y Rojo Calibre 16 ya que soportan hasta 10A y estos llevan un voltaje DC (24V).

3.2.3.2. Potencia de Control (DC 24V):

- Una fuente de alimentación SITOP PSU100S convierte la tensión de línea (conectada a L1) a DC 24V (terminales L+ y M).
- Esta alimentación de 24V DC energiza el PLC LOGO! 8, el módulo de extensión y el HMI.

3.2.3.3. Unidad de Control Lógico (PLC) y HMI

- **PLC Base:** El LOGO! 8 (6ED1052-1MD00-0BA8) posee la programación del control de temperatura por PWM accionado por las 2 termocuplas conectadas en las entradas análogas.
- **HMI:** La SIMATIC HMI TOUCH se conecta al PLC a través del puerto LAN (Ethernet). Esta interfaz permite al operador establecer el setpoint de temperatura, monitorear las variables de proceso y activar/desactivar el control.

- **Conexión de Comunicaciones:** La comunicación entre el PLC y la HMI utiliza el protocolo Ethernet/PROFINET (Cable Azul).

3.2.4. Módulo de expansión del LOGO!

Se utiliza un módulo de expansión LOGO! AM2 (6ED1055-1MA00-0BA2) Para poder generar la señal PWM que permitirá un control constante de potencia en la resistencia mediante el SCR.

- **Sensor S1 (Reactor):** El sensor encargado de la variable de proceso principal (temperatura interna del reactor) se conecta a la entrada analógica I7
- **Sensor S2 (Ambiente):** El sensor de temperatura ambiente se conecta a la entrada analógica I8

3.2.5. **Función:** Ambas señales entran como señales análogas para ser procesadas en la programación del control.

3.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONTROL DE TEMPERATURA

El desarrollo de la interfaz se realiza utilizando el entorno Siemens TIA Portal, el cual integra las herramientas necesarias para la programación del PLC, la configuración de los sensores SITRANS y el diseño de la HMI (Human Machine Interface). Todo el sistema se orienta a garantizar un control preciso, seguro y eficiente de la temperatura en el núcleo y las paredes del reactor.

3.3.1. Arquitectura General del Sistema

El sistema de control está compuesto por los siguientes elementos principales:

- **Sensores de temperatura:**
 - **Sensor de núcleo del reactor:** *SITRANS TS500*, encargado de medir la temperatura interna en la zona de mayor reacción térmica.
 - **Sensor de pared del reactor:** *Termopar tipo K SITRANS TS300*, encargado de registrar la temperatura superficial de la pared del reactor para el control térmico estructural.
- **Controlador lógico programable (PLC):**
 - Un Siemens LOGO! 8.3 (6ED1052-1MD08-0BA1) con entradas analógicas configuradas para lectura de termopares y módulos de adquisición de temperatura.
- **Interfaz Hombre-Máquina (HMI):**
 - Panel táctil HMI KTP400 Básico equivalente, conectado al PLC vía Profinet, donde se visualizarán las variables del proceso y se permitirá la interacción del operador.

- **Software de desarrollo:**
 - Siemens TIA Portal V18, utilizado para la configuración, programación y vinculación entre PLC, sensores y HMI.

3.3.2. Beneficios del Diseño Propuesto

El diseño de la interfaz ofrece las siguientes ventajas:

- **Supervisión en tiempo real** de las variables críticas.
- **Seguridad operativa** mediante alarmas y bloqueos.
- **Registro histórico** para análisis y trazabilidad.
- **Facilidad de mantenimiento** y diagnóstico.
- **Escalabilidad** para integrar futuros sensores o variables del proceso.

3.4. DISEÑO INTERFAZ(HMI)

La interfaz Hombre–Máquina (HMI) constituye el medio de interacción principal entre el operador y el sistema de acondicionamiento térmico del reactor gasificador. Su función es permitir la supervisión visual, el ajuste de parámetros de control, la visualización de alarmas y la ejecución de acciones operativas sobre el sistema. Para este proyecto se desarrolló una simulación funcional de la HMI utilizando ReactJS, con el fin de representar de forma fiel la funcionalidad que tendría un panel Siemens KTP400 Basic en operación real.

3.4.1. Objetivos de la interfaz HMI

La interfaz fue diseñada con los siguientes objetivos funcionales:

- **Supervisar en tiempo real** las dos variables térmicas críticas del proceso:
 - Temperatura del núcleo del reactor (sensor SITRANS TS500).
 - Temperatura de la pared externa del reactor (sensor SITRANS TS300).
- Controlar el setpoint térmico del proceso, permitiendo al operador incrementar o disminuir la temperatura objetivo según los requerimientos del proceso de gasificación.
- Permitir la selección del modo de operación del sistema de calefacción:
 - **Modo Automático (PI–PWM):** control cerrado basado en el error entre setpoint y temperatura.
 - **Modo Manual:** ajuste directo del ciclo útil del PWM para accionar el SCR.
- Visualizar y gestionar alarmas térmicas, tales como sobretemperatura, desviación respecto al setpoint y gradiente térmico anormal.
- Representar gráficamente el estado operativo del sistema, incluyendo estado del calentador, potencia aplicada y estado del reactor.

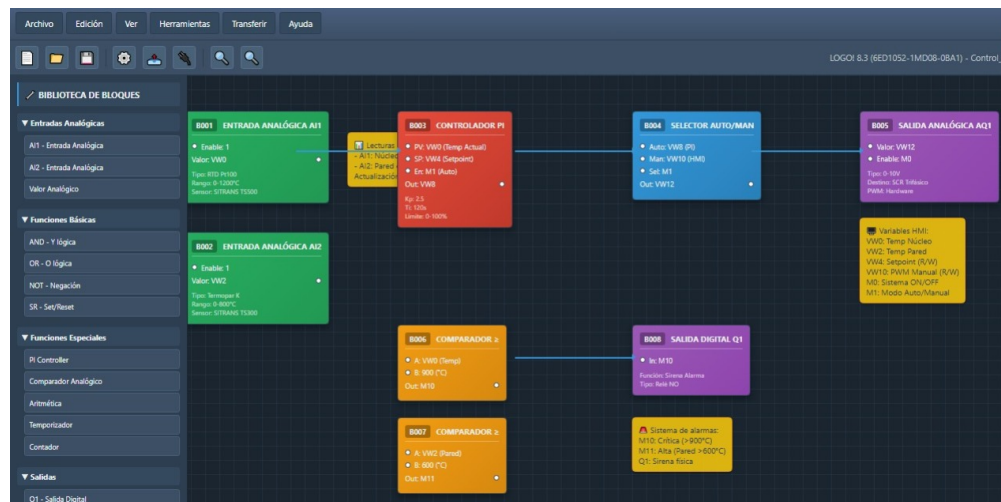
3.4.2. Arquitectura general de la HMI

La HMI está organizada en cuatro pantallas principales, las cuales replican la estructura de navegación típica del panel Siemens KTP400 Basic:

1. **Pantalla Principal:** muestra los valores de proceso más importantes.
2. **Pantalla de Control:** permite ajustar el setpoint y seleccionar el modo de operación.
3. **Pantalla de Alarmas:** registra y visualiza en forma estructurada los eventos de seguridad.
4. **Pantalla de Tendencias:** resume las variables térmicas y su evolución instantánea.

El diseño gráfico incluye indicadores numéricos, como se observa en la figura 15 se usan barras analógicas con codificación por colores (verde, amarillo, rojo) y botones tipo industrial, imitando las interfaces de los sistemas Siemens WinCC Basic/Comfort.

Figura 15. Arquitectura general HMI.



Fuente. Elaboración propia HMI

3.4.3. Variables del sistema representadas en la HMI

Las variables mostradas en la tabla 14 son las mismas en la interfaz que corresponden directamente a los valores que serían adquiridos y procesados por el PLC Siemens LOGO! 8.3, en conjunto con los módulos AM2 RTD y AM2:

Tabla 14. Variables del HMI.

Variable	Descripción	Unidad	Origen
tempNucleo	Temperatura del núcleo medida por el SITRANS TS500	°C	Sensor 1 → AM2 RTD
tempPared	Temperatura de la pared medida por SITRANS TS300	°C	Sensor 2 → AM2 RTD
setpoint	Valor objetivo definido por el operador	°C	HMI
potenciaPWM	Potencia aplicada al SCR mediante PWM	%	Salida del PLC
sistemaActivo	Indica si el calefactor está energizado	—	Bit operativo
modoAuto	Estado del modo de operación (Auto/Manual)	—	HMI
alarmaAlta	Alarma de sobrecalentamiento o desviación	—	Lógica del PLC
alarmaCritica	Alarma crítica por temperatura excesiva	—	Lógica del PLC

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.4. Lógica funcional del control representada en el código

Aunque la simulación se desarrolla en ReactJS, la lógica implementada corresponde directamente al comportamiento programado en el PLC, especialmente en lo referente al control PI–PWM del sistema de calefacción.

a) Cálculo del error y ajuste automático de potencia

El código replica un control PI simplificado:

```
let errorTemp = setpoint - tempNucleo;
if (modoAuto) {
    nuevaPotencia = Math.min(100, Math.max(0, 50 + (errorTemp · 2,5)));
}
```

El controlador aumenta o disminuye el ciclo útil PWM en función del error. Este comportamiento representa el control PI implementado en el PLC LOGO! 8.3 mediante el bloque PID y la modulación PWM por salida digital.

b) Dinámica térmica del reactor

El comportamiento térmico del reactor se simula mediante un modelo de primer orden:

const inercia = 0,95;

const ganancia = nuevaPotencia · 0,15;

const perdida = (tempNucleo - 25) · 0,02;

- La inercia térmica modela el tiempo de respuesta del lecho de biomasa.
- La ganancia simula la entrega de calor por la resistencia eléctrica (SCR).
- Las pérdidas representan la disipación de calor hacia la pared y el ambiente.

c) Modelado térmico de la pared externa

La temperatura de pared se calcula como:

let nuevaTempPared = tempNucleo · 0,65 + tempPared · 0,3;

- La pared recibe una fracción del calor del núcleo.
- Mantiene una parte de su temperatura previa (histéresis térmica).

Este comportamiento coincide con la transferencia de calor por conducción y radiación desde el reactor hacia el aislamiento.

d) Gestión de alarmas

Las alarmas se generan con criterios industriales estandarizados:

setAlarmaCritica(nuevaTempNucleo > 900);

setAlarmaAlta(nuevaTempNucleo > setpoint + 50 || nuevaTempPared > 600);

- 900°C → riesgo crítico de daño estructural del reactor.
- 600°C en pared → riesgo de falla del aislamiento.
- ±50°C desde SP → inestabilidad térmica.

3.4.5. Diseño de las pantallas HMI

Caracterización del modelo de interfaz HMI para el control.

3.4.5.1. Pantalla Principal

En la figura 16 se observa que incluye:

- Valor numérico grande de temperatura del núcleo y pared.
- Barras analógicas con colores de seguridad.
- Indicador de estado del sistema.
- Estado de alarmas.
- Setpoint actual.
- Potencia aplicada (PWM).

Figura 16. Interfaz pantalla principal.



Fuente. Elaboración propia HMI

3.4.5.2. Pantalla de Control

En la figura 17 se observa:

- Ajustar el setpoint en incrementos de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ y $\pm 50^{\circ}\text{C}$.
- Seleccionar el modo Auto/Manual.
- Controlar la potencia manual en 0%, 33%, 66% y 100%.

Figura 17. Interfaz pantalla de control.



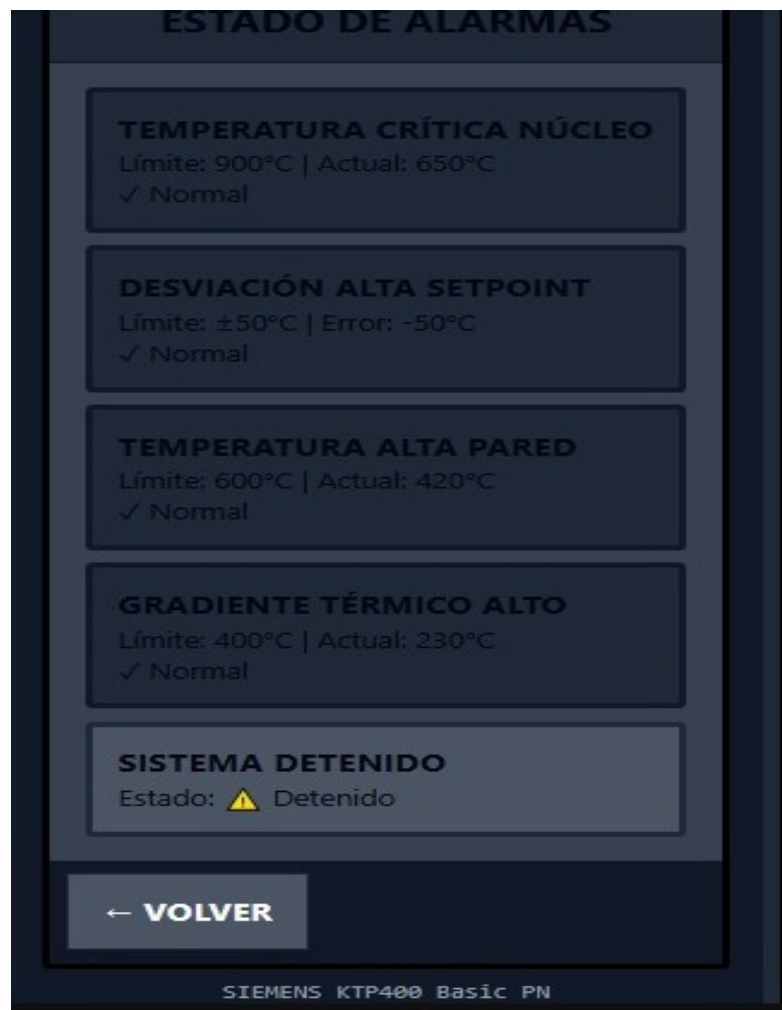
Fuente. Elaboración propia HMI

3.4.5.3. Pantalla de Alarmas

En la figura 18 se observa clasificación de las alarmas según severidad:

- Críticas (rojas, parpadeo).
- Altas (naranja).
- Advertencias (amarillo).

Figura 18. Interfaz pantalla de alarmas.



Fuente. Elaboración propia HMI

3.4.5.4. Pantalla de Tendencias

La figura 19 muestra:

- Temperaturas actuales.
- Gradiente térmico.
- Error de control.
- Valores claves resumidos.

Figura 19. Interfaz pantalla de tendencias.



Fuente. Elaboración propia HMI

3.4.6. Representación visual del hardware

El componente final envuelve la interfaz dentro de un marco gráfico que simula el aspecto físico del HMI Siemens KTP400 Basic.

Incluye:

- Bordes oscuros.
- Pantalla industrial de 4".
- LED indicador de operación.
- Etiqueta del modelo del panel.

4. SISTEMA DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN EN MATLAB

Con el fin de validar el funcionamiento del controlador diseñado en el PLC Siemens LOGO! 8.3, se desarrolló un modelo de simulación en MATLAB que reproduce el comportamiento térmico del reactor y la acción de control del sistema. Esta simulación permitió analizar la respuesta del proceso, verificar el comportamiento del control PI–PWM y observar la estabilidad térmica ante variaciones de temperatura o perturbaciones, como una caída térmica simulada.

4.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LA SIMULACIÓN

El programa desarrollado en MATLAB está organizado en tres secciones principales:

Tabla 15. Estructura de simulación.

Sección del código	Descripción funcional
Definición de parámetros físicos y de control	Incluye los valores de masa del reactor, calor específico, pérdidas térmicas, potencia de la resistencia y constantes del controlador PI.
Bucle de simulación térmica	Modela la variación de temperatura en función del tiempo según la ecuación de balance energético, simulando la respuesta del sensor (retardo + ruido) y el cálculo del control PWM.
Visualización de resultados	Genera tres gráficas separadas: Temperatura vs tiempo, señal de control (duty y pulsos), y comparación entre la acción de control y la temperatura medida.

Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente, las constantes del controlador proporcional–integral utilizadas en la simulación fueron determinadas mediante un proceso de ajuste empírico asistido por simulación en MATLAB.

Como se ve en la Tabla 15 Inicialmente se partió del análisis del comportamiento térmico del reactor, el cual presenta características de sistema de primer orden con alta inercia térmica. Bajo estas condiciones, se seleccionó una estructura de control PI, debido a que permite eliminar el error en estado estacionario sin amplificar el ruido de medición presente en sensores de temperatura industriales.

Posteriormente, se realizó un proceso iterativo de ajuste en el entorno de simulación, evaluando diferentes combinaciones de ganancia proporcional y tiempo integral, con el objetivo de obtener estabilidad térmica, bajo sobreimpulso y una respuesta adecuada ante perturbaciones térmicas simuladas.

4.2. MODELO TÉRMICO DEL REACTOR

El reactor se modeló como un sistema de capacidad térmica concentrada (modelo de primer orden), cuya dinámica se describe mediante la ecuación diferencial de balance energético:

$$C \frac{dT}{dt} = Q_h - \frac{(T - T_{amb})}{R_{loss}} \quad (4.1)$$

Como se observa en la tabla 16 este modelo representa el efecto de la masa térmica del reactor y las pérdidas por conducción, convección y radiación. Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Tabla 16. Modelo térmico.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa del reactor	m	0.35	kg
Calor específico	cp	500	J/kg·°C
Potencia máxima	P_{max}	1800	W
Resistencia térmica	R_{loss}	0.6	°C/W
Temperatura ambiente	T_{amb}	25	°C

Fuente: Elaboración Propia.

4.3. CONTROL PI-PWM

El sistema de control implementado se basa en una estrategia PI-PWM en lazo cerrado, donde la señal de control se obtiene a partir del error entre la temperatura medida y el valor de referencia.

La acción de control se define a partir de la ecuación general del controlador PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (4.2)$$

Sin embargo, debido a la naturaleza térmica del sistema, caracterizada por alta inercia y dinámica lenta, se emplea únicamente la acción proporcional e integral, eliminando el término derivativo para evitar amplificación de ruido y comportamiento inestable.

4.4. OBTENCION DE PARAMETROS DEL CONTROLADOR

Los parámetros del controlador PI fueron determinados mediante el método de Ziegler–Nichols en lazo cerrado, el cual permite estimar las ganancias a partir de la respuesta dinámica del sistema.

Para la aplicación de este método, se configuró inicialmente el controlador en modo proporcional puro, desactivando la acción integral y derivativa. Posteriormente, se incrementó progresivamente la ganancia proporcional hasta llevar el sistema al límite de estabilidad, obteniendo una respuesta con oscilaciones sostenidas.

En este punto se identificaron los parámetros característicos del sistema:

- Ganancia crítica (K_u): valor de la ganancia proporcional a partir del cual el sistema presenta oscilaciones constantes.
- Periodo de oscilación (T_u): tiempo correspondiente a un ciclo completo de las oscilaciones sostenidas observadas en la respuesta del sistema.

Estos parámetros fueron obtenidos a partir de la respuesta temporal de la simulación, analizando la señal de temperatura del reactor.

A partir de los valores de K_u y T_u , se determinaron los parámetros del controlador PI utilizando las relaciones de Ziegler–Nichols.

Con base en el procedimiento anterior y tras ajustes finos en simulación, se definieron los siguientes valores para el controlador:

$$K_p = 0,5$$

$$T_i = 9$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0,0556$$

Este procedimiento permitió obtener un conjunto de parámetros que garantizan una respuesta estable, con un compromiso adecuado entre rapidez y precisión en el seguimiento de la temperatura.

4.5. IMPLEMENTACION PI-PWM

La señal de control generada por el PI es convertida en una señal PWM, la cual modula el tiempo de activación del sistema de calentamiento.

El ciclo de trabajo (duty cycle) es proporcional a la salida del controlador, permitiendo ajustar la potencia suministrada de forma continua.

Esta estrategia resulta adecuada para sistemas térmicos, ya que evita conmutaciones bruscas y permite un control más suave de la energía, mejorando la estabilidad del sistema.

4.6. DISCRETIZACIÓN DEL MODELO Y SIMULACIÓN

El modelo térmico del reactor fue implementado en un entorno de simulación discreto, utilizando ecuaciones en diferencias para representar la evolución temporal del sistema.

El comportamiento térmico del reactor fue modelado a partir de un balance energético de primer orden, considerando un nodo térmico equivalente que representa la masa del sistema.

La dinámica del sistema en tiempo continuo se expresa como:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q_h(t) - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{toss}} \quad (4.3)$$

Donde $C = mC_p$ corresponde a la capacidad térmica del sistema, Q_h es la potencia suministrada por el sistema de calentamiento y el término $\frac{T(t) - T_{amb}}{R_{toss}}$ representa las pérdidas térmicas hacia el ambiente.

La potencia suministrada está modulada por una señal PWM, la cual se define como:

$$Q_h[k] = u_{pwm}[k] \cdot P_{max} \cdot \eta \quad (4.4)$$

Donde u_{pwm} corresponde al ciclo de trabajo del controlador, P_{max} es la potencia máxima del sistema y η la eficiencia térmica.

Para su implementación computacional, el modelo fue discretizado mediante un esquema de integración hacia adelante (Euler explícito), obteniendo la siguiente ecuación en diferencias:

$$T[k + 1] = T[k] + \Delta t \cdot \frac{1}{C} \left(Q_h(t) - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{toss}} \right) \quad (4.5)$$

Este enfoque permite simular la evolución temporal de la temperatura del sistema de manera iterativa, manteniendo coherencia con la dinámica térmica real del proceso.

Como se evidencia en la Figura 21, la señal de control tipo PI-PWM modula el ciclo de trabajo (duty cycle) en función del error térmico, generando una secuencia de pulsos que regulan la potencia suministrada al sistema. Esta modulación permite que la temperatura del reactor alcance el valor de referencia y se mantenga estable a lo largo del tiempo.

Dado que se trata de un sistema térmico de dinámica lenta, el uso de un modelo discreto resulta adecuado, ya que no introduce errores significativos en la representación del comportamiento del sistema.

Figura 21. Señal de control PI–PWM: Duty (%) y temperatura (°C).



Fuente: Elaboración Propia.

4.7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de validar el comportamiento del modelo térmico y del controlador PI–PWM implementado, se realizaron diferentes escenarios de simulación orientados a evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones normales de operación, perturbaciones y perfiles térmicos programados.

4.8. VALIDACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL REACTOR HASTA TEMPERATURA OBJETIVO

En una primera etapa, se evaluó la capacidad del sistema para realizar el calentamiento del reactor desde temperatura ambiente hasta la temperatura objetivo de 900 °C.

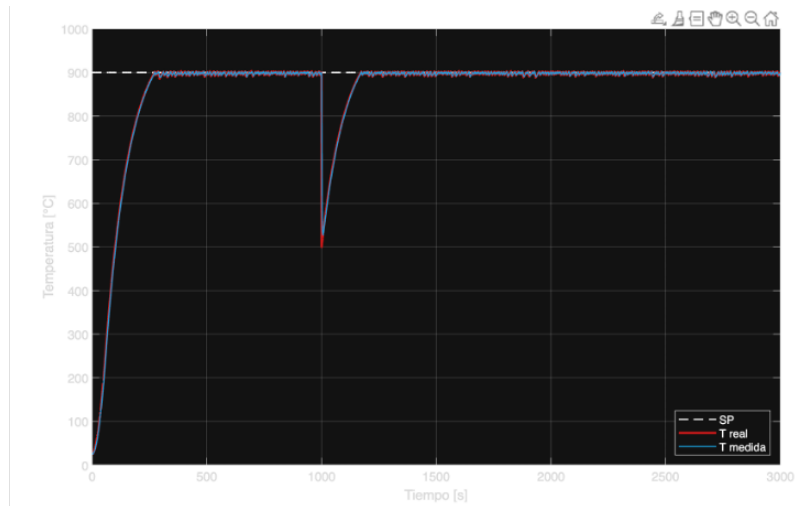
Los resultados muestran que el controlador inicia con una etapa de soft-start, permitiendo un incremento progresivo de la potencia del sistema de calefacción, evitando esfuerzos térmicos abruptos sobre el reactor. Posteriormente, el controlador ajusta el ciclo útil del PWM para mantener la temperatura estable alrededor del setpoint, compensando las pérdidas térmicas del sistema.

4.9. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ANTE PERTURBACIONES TÉRMICAS

Con el fin de analizar la robustez del sistema de control, se simuló una perturbación térmica consistente en una caída abrupta de temperatura hasta aproximadamente 400 °C.

Los resultados muestreados en la figura 22 se observa como el controlador PI incrementa rápidamente el ciclo útil del PWM hasta valores cercanos al 100 %, permitiendo recuperar la temperatura del reactor de forma estable y sin oscilaciones significativas. Este comportamiento evidencia la capacidad del controlador para compensar perturbaciones externas y mantener la estabilidad térmica del proceso.

Figura 22. Respuesta del sistema ante caída térmica simulada: Temperatura del reactor y señal PWM.



Fuente: Elaboración Propia.

4.10. EVALUACIÓN DEL CONTROLADOR ANTE PERFILES TÉRMICOS PROGRAMADOS

Posteriormente, se evaluó el desempeño del sistema ante perfiles térmicos programados con diferentes pendientes de calentamiento, con el fin de analizar la capacidad del controlador para seguir trayectorias térmicas variables.

Se implementaron tres perfiles térmicos:

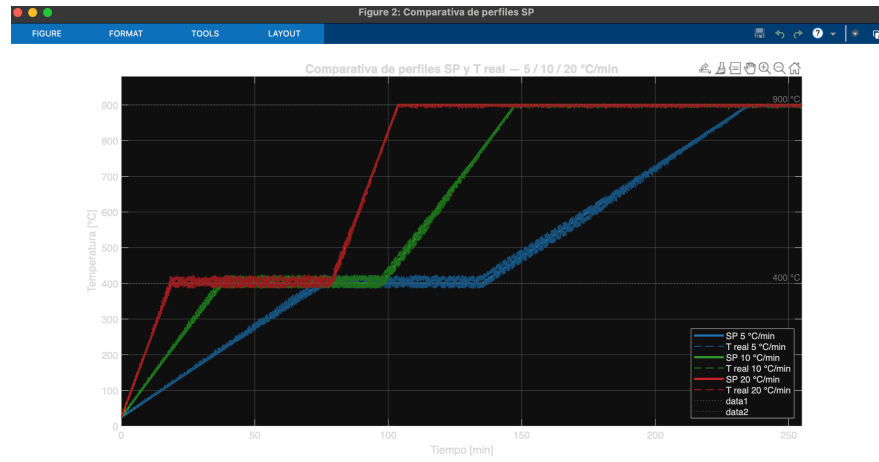
- Pendiente de 5 °C/min
- Pendiente de 10 °C/min
- Pendiente de 20 °C/min

Cada perfil incluyó tres etapas: una rampa inicial desde temperatura ambiente hasta 400 °C, una meseta térmica a 400 °C durante 60 minutos y una rampa final hasta alcanzar la temperatura objetivo de 900 °C.

Los resultados en la figura 23, muestran que el sistema de control PI-PWM permite seguir adecuadamente el perfil térmico programado, manteniendo desviaciones mínimas respecto al setpoint incluso para pendientes de calentamiento elevadas.

Durante la etapa de meseta térmica, el controlador ajusta dinámicamente la señal PWM para compensar las pérdidas térmicas del sistema, manteniendo la temperatura estable alrededor del valor objetivo.

Figura 23. Comparación entre los perfiles térmicos programados y la respuesta térmica simulada del reactor para pendientes de calentamiento de 5, 10 y 20 °C/min.



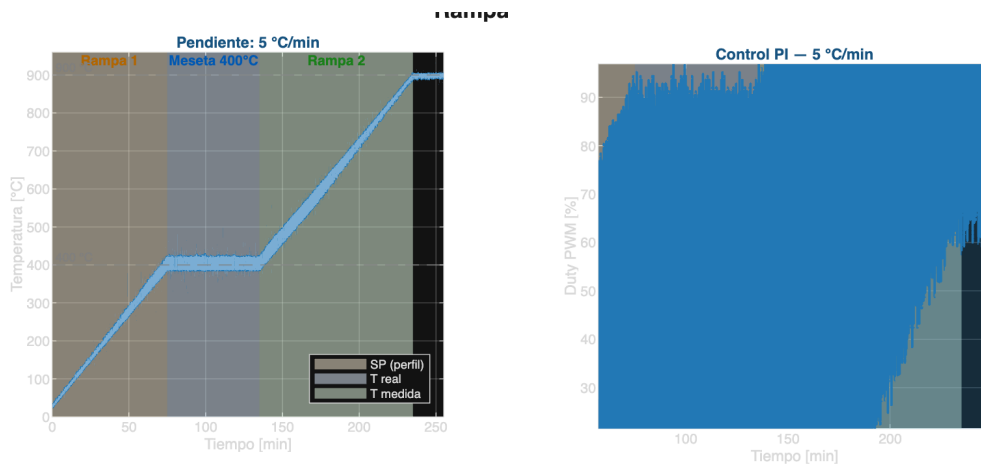
Fuente: Elaboración Propia.

4.11. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL CONTROLADOR PI

El análisis de la figura 24, 25 y 26 la señal de control muestra que el controlador adapta la potencia aplicada en función del perfil térmico requerido. Para pendientes de calentamientos mayores, se observa un incremento en la demanda de potencia del sistema, reflejado en un aumento del ciclo útil del PWM.

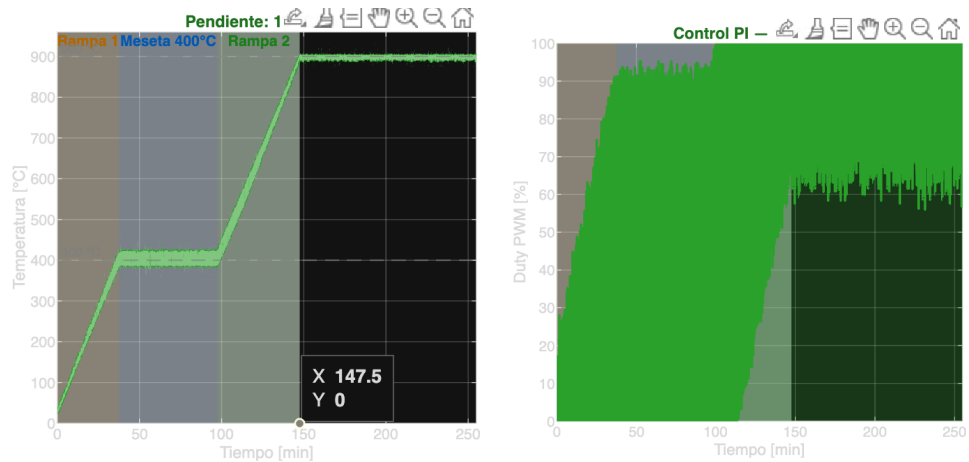
Este comportamiento es consistente con la dinámica térmica del reactor y demuestra la capacidad del controlador para operar en diferentes condiciones de carga térmica sin comprometer la estabilidad del proceso.

Figura 24. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 5 °C/min.



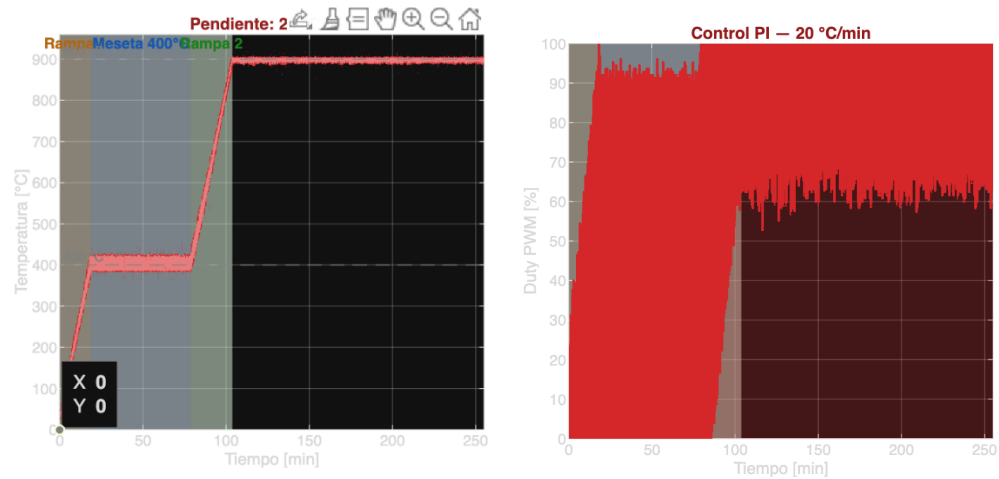
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 25. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 10°C/min.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 26. Señal de control PWM para perfiles térmicos de 20°C/min.



Fuente: Elaboración Propia.

4.12. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la estrategia PI–PWM es más eficiente que un control ON–OFF tradicional, ya que evita sobrecalentamientos, reduce el estrés térmico en la resistencia y mantiene la temperatura con menor oscilación.

Desde el punto de vista dinámico, el sistema controlado mediante PI–PWM presenta una respuesta más suave y progresiva ante cambios de consigna. A diferencia del control ON–OFF, donde la señal de salida conmuta entre estados extremos, el esquema PI–PWM

permite una modulación continua de la potencia térmica, lo que reduce significativamente el sobreimpulso y las oscilaciones alrededor del setpoint. Este comportamiento es consistente con la teoría de control aplicada a sistemas de primer orden con retardo dominante, donde estrategias de control continuo permiten una mejor regulación frente a sistemas discretos de conmutación (Ogata, 2010).

En términos de estabilidad térmica, el controlador PI logra mantener la temperatura dentro de un margen estrecho respecto al valor de referencia, compensando de manera efectiva las pérdidas energéticas inherentes al sistema. La acción integral resulta determinante en este proceso, ya que elimina el error en estado estacionario causado por perturbaciones constantes, como las pérdidas por conducción, convección y radiación (Åström & Murray, 2008). Este aspecto es crítico en procesos de pirólisis, donde pequeñas desviaciones de temperatura pueden afectar la cinética de reacción y, por ende, la calidad de los productos obtenidos.

Adicionalmente, la implementación de la modulación por ancho de pulso (PWM) introduce mejoras significativas en la eficiencia energética del sistema. Al ajustar dinámicamente el ciclo de trabajo en función del error térmico, el sistema suministra únicamente la energía necesaria en cada instante, evitando el consumo excesivo característico de sistemas ON–OFF. Este tipo de control ha demostrado ser especialmente eficaz en sistemas térmicos de alta inercia, donde la entrega continua y modulada de energía permite un mejor aprovechamiento del calor generado (Erickson & Maksimović, 2001).

Desde el punto de vista del diseño del controlador, la elección de un esquema PI frente a un controlador PID se justifica por la naturaleza del proceso térmico. Los sistemas de calentamiento presentan dinámicas lentas y una alta constante de tiempo, lo que reduce la utilidad del término derivativo. Diversos estudios indican que, en este tipo de sistemas, la acción derivativa puede amplificar el ruido de medición sin aportar mejoras significativas en el tiempo de establecimiento, comprometiendo incluso la estabilidad del sistema (Seborg, Edgar & Mellichamp, 2011). En consecuencia, el controlador PI proporciona un balance adecuado entre simplicidad, robustez y desempeño.

En cuanto al esfuerzo térmico sobre los componentes, la estrategia PI–PWM reduce los ciclos abruptos de encendido y apagado, disminuyendo las dilataciones térmicas repetitivas en la resistencia y en la estructura del reactor. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también incrementa la vida útil de los componentes, lo cual es un factor relevante en aplicaciones industriales donde la confiabilidad del sistema es un criterio de diseño fundamental (Incropera et al, 2007).

Por otra parte, los resultados de simulación evidencian que el sistema cumple con los criterios de desempeño definidos en la metodología, tales como un tiempo de subida adecuado, un sobreimpulso limitado y ausencia de oscilaciones sostenidas. Esto valida tanto el modelo térmico implementado como la estrategia de control seleccionada, demostrando la viabilidad técnica del sistema propuesto en condiciones controladas.

No obstante, es importante señalar que los resultados se obtuvieron bajo condiciones de simulación, lo que implica ciertas idealizaciones del sistema. En una implementación real, factores como retardos en la medición, no linealidades térmicas, variaciones en las

propiedades de la biomasa y perturbaciones externas podrían influir en el desempeño del controlador. Por ello, se recomienda en trabajos futuros la validación experimental del sistema y la evaluación de estrategias de control más avanzadas, como control adaptativo o robusto, en caso de requerirse mayor tolerancia a incertidumbres del proceso (Seborg et al., 2011).

En consecuencia, el esquema PI–PWM no solo demuestra ser adecuado desde el punto de vista teórico, sino también práctico, al ofrecer una solución eficiente, estable y técnicamente viable para el control térmico en procesos de gasificación de biomasa. No obstante, es importante señalar que los resultados se obtuvieron bajo condiciones de simulación, lo que implica ciertas idealizaciones del sistema. En una implementación real, factores como retardos en la medición, no linealidades térmicas, variaciones en las propiedades de la biomasa y perturbaciones externas podrían influir en el desempeño del controlador. Por ello, se recomienda en trabajos futuros la validación experimental del sistema y la evaluación de estrategias de control más avanzadas, como control adaptativo o robusto, en caso de requerirse mayor tolerancia a incertidumbres del proceso.

En consecuencia, el esquema PI–PWM no solo demuestra ser adecuado desde el punto de vista teórico, sino también práctico, al ofrecer una solución eficiente, estable y técnicamente viable para el control térmico en procesos de gasificación de biomasa.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las condiciones térmicas y físicas requeridas para el diseño del sistema de calentamiento del reactor, identificando que la mayor demanda energética se concentra en el cuerpo metálico del sistema. Esto permitió establecer criterios adecuados para la selección de materiales, aislamiento térmico y dimensionamiento del sistema de calefacción, garantizando condiciones térmicas adecuadas para procesos de pirólisis y gasificación de biomasa.

Se diseñó e implementó un sistema de control térmico basado en un esquema PI–PWM sobre un PLC Siemens LOGO! 8.3, logrando una regulación estable y precisa de la temperatura del reactor. El sistema desarrollado permitió reducir la oscilación térmica y optimizar el consumo energético frente a estrategias ON–OFF convencionales, integrando además funcionalidades de monitoreo y operación mediante interfaz HMI.

Se validó el desempeño del sistema mediante modelado matemático y simulación en MATLAB, evaluando su comportamiento ante perturbaciones térmicas y perfiles térmicos programados con diferentes pendientes de calentamiento. Los resultados demostraron que el sistema puede alcanzar temperaturas cercanas a 900 °C con errores menores al 2 %, confirmando la validez del modelo térmico y de la estrategia de control implementada.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Recomendaciones generales

- Implementar físicamente el sistema de control propuesto, empleando sensores PT100 de tres hilos y relés SSR industriales, para validar experimentalmente los resultados obtenidos por simulación.
- Incluir una etapa de calibración térmica del reactor, comparando las lecturas del sensor con un termómetro patrón, garantizando trazabilidad metrológica.
- Desarrollar un sistema de registro de datos (Data Logging) mediante comunicación Ethernet entre el LOGO! y una interfaz HMI o software SCADA.
- Incorporar rutinas de seguridad adicionales: apagado automático ante sobretemperatura, detección de fallos de sensor o interrupciones en la alimentación.
- Mejorar el aislamiento térmico con materiales cerámicos o refractarios avanzados para reducir pérdidas energéticas.
- Optimizar el algoritmo de control implementando técnicas PID autotuning o control difuso para mejorar la estabilidad ante perturbaciones térmicas.
- Realizar un análisis costo–beneficio que relacione consumo energético, tiempo de calentamiento y eficiencia global del proceso.
- Al hacer el mantenimiento toca con el equipo apagado y no echando agua directamente al equipo electrónico

6.2 Trabajos futuros

- Ampliar el modelo del reactor para incluir transferencia de masa y flujo de gases, utilizando software como COMSOL Multiphysics o ANSYS Fluent, que permitan simular la pirolisis completa.
- Escalar el diseño a reactores de mayor volumen (1–5 litros) para analizar la estabilidad térmica en aplicaciones semiindustriales.
- Integrar un sistema de supervisión remota mediante IoT (Internet of Things) para la visualización y control desde plataformas web.
- Investigar el comportamiento térmico de otras biomásas colombianas (cascarilla de arroz, aserrín, cáscara de café), comparando su poder calorífico y rendimiento térmico.
- Implementar un control predictivo basado en modelos (MPC) para optimizar el uso de energía eléctrica y mejorar la respuesta dinámica del sistema.
- Estudiar el impacto ambiental y energético del sistema en términos de reducción de emisiones y eficiencia global del proceso de gasificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allende, S., Brodie, G., & Jacob, M. V. (2023). Breakdown of biomass for energy applications using microwave pyrolysis: A technological review. *Environmental Research*, 226, 115619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115619>
- Ghasem, N. (2006). Design of a fuzzy logic controller for regulating the temperature in industrial polyethylene fluidized bed reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(2), 84–93. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876206728635>
- Hafting, F., Kulas, D. G., Michels, E., Chipkar, S., Wisniewski, S., Shonnard, D., & Pearce, J. (2023). Modular open-source design of pyrolysis reactor monitoring and control electronics. *Electronics*, 12(24), 4893. <https://doi.org/10.3390/electronics12244893>
- Ruiz-Gómez, N., Quispe, V., Lebrun, M., Boutin, O., & Peyrot, M. (2022). Towards a better understanding of the thermal degradation of sugarcane bagasse by pyrolysis: Characterization and modeling. *Journal of the Energy Institute*, 105, 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.07.016>
- Vargas-Machuca, J., Pabón-León, J., Morales-Acevedo, A., & Torres-Barahona, E. (2023). Pyrolysis process control: Temperature control design and application for optimum process operation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105901>
- National Instruments. (s.f.). *Tutorial: MathScript and Formula Nodes*. Recuperado el 08 de 03 de 2017, de <http://www.ni.com/white-paper/7572/en/>
- Penagos Corp. SA. (2016). *Catalogo de trilladoras Apollo* (9 ed. ed.). Alfaomega.
- Unipiloto. (s.f.). *proyecto de grado*. Recuperado el 22 de 03 de 2017, de <http://www.unipiloto.edu.co/>
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- Knoef, H. (2012). *Handbook biomass gasification*. BTG Biomass Technology Group.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Potencial energético de la biomasa en Colombia*. Gobierno de Colombia.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (5ª ed.). McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). Wiley.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ª ed.). Pearson Educación.

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.

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

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*.

Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*.

Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2011). *Process Dynamics and Control*.

Incropera, F. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

Siemens. (2023). *SITRANS TS500 Temperature Sensors – Technical Data*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

Siemens. (2022). *LOGO! AM2 AQ Analog Output Module – Technical Data*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

Siemens. (2023). *SITRANS TS300 Temperature Sensors – Technical Documentation*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

Siemens. (2022). *LOGO! 8 Logic Module – Manual and Technical Data*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

Siemens. (2022). *LOGO! AM2 AQ Analog Output Module – Technical Data*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

Siemens. (2023). *SITOP PSU100S Power Supply – Technical Data*. Siemens AG. <https://support.industry.siemens.com>

RKC Instrument Inc.. (2021). *Thyristor Power Controllers – Phase Angle Control (SCR)*. RKC Instrument Inc. <https://www.rkcinst.com>

Watlow. (2022). *Industrial Electric Heating Elements – Design Guide*. Watlow Electric Manufacturing Company. <https://www.watlow.com>

Schneider Electric. (2023). *Miniature Circuit Breakers – Technical Guide*. Schneider Electric. <https://www.se.com>

Compañía General de Aceros. (2024). *Ficha técnica acero inoxidable AISI 310*. Recuperado de <https://www.cga.com.co>

Compañía General de Aceros. (2024). *Ficha técnica acero inoxidable AISI 304 / 304L*. Recuperado de <https://www.cga.com.co>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ª ed.). Pearson.

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.

- Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). Fundamentals of power electronics (2nd ed.). Springer.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2011). Process dynamics and control (3rd ed.). Wiley.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer (6th ed.). Wiley.

ANEXO 01.

**CODIGO FUENTE DEL MODELO DE
SIMULACION EN MATLAB**

ANEXO 01. CODIGO FUENTE DEL MODELO DE SIMULACION EN MATLAB

En este anexo (Anexo 01) se presenta el código completo utilizado para la simulación térmica del reactor y la validación del controlador PI-PWM desarrollado en el presente trabajo.

```
% --- Objetivo y masa ---
Tset = 900; % [°C] setpoint objetivo
m_core = 0.35; % [kg] masa equivalente del nodo térmico

% --- Planta: potencia y pérdidas
Pmax = 1800; % [W] potencia máxima del calefactor (fácil de cambiar)
R_loss = 0.68; % [°C/W] resistencia térmica total (sube = menos pérdidas)

% --- Otros parámetros físicos ---
Tamb = 25; % [°C] temperatura ambiente
cp_core = 500; % [J/(kg·°C)] calor específico equivalente
eta_h = 0.98; % [-] eficiencia térmica global

% --- Control PI tipo LOGO ---
Kp = 0.5; % ganancia proporcional
Ti = 0.15+60; % [s] tiempo integral
Ki = Kp / Ti; % [1/s] ganancia integral equivalente

% --- Sensor
tau_s = 1.5; % [s] constante de tiempo del sensor
noise_rms = 0.8; % [°C] ruido (RMS) sobre la medida

% --- PWM y modelado de pulsos ---
Tw = 1.8; % [s] ventana PWM (1 s imita bien el LOGO)
usePulses = true; % true = excitar planta con gate

% --- Arranque suave y pendiente de duty
t_soft = 60; % [s] tiempo para crecer duty_max de 0→1 (soft-start)
slewPctS = 12; % [%/s] cambio máx del duty por segundo (slew-rate)

% --- Evento de caída térmica
useDrop = true; % activar evento de caída
t_drop = 2000; % [s] instante de la caída
T_drop = 400; % [°C] valor absoluto al que cae T real (salto)

% --- Opcional: Fondo de figuras (elige 'w' o 'k')
fig_bg = 'w'; % 'w' = blanco (recomendado), 'k' = negro
%% =====

% Preparación de tiempo y capacidades
t = 0:dt:tEnd; N = numel(t);
C = m_core + cp_core;

% Variables de estado
SP = Tset + ones(1,N);
T = zeros(1,N); T(1) = Tamb; % T real
T_meas = zeros(1,N); T_meas(1) = Tamb; % T medida por sensor
duty_c = zeros(1,N); % duty continuo del PI saturado 0..1
duty = zeros(1,N); % duty tras soft-start y slew
gate = zeros(1,N); % 0/1 pulsos PWM
I = 0; % estado integral
slewPU = max(slewPctS,1e-3)/100; % por-unidad por segundo
```



```

%% ===== Simulación =====
for k = 2:N
    % Evento de caída térmica en T real
    if useDrop && t(k-1) < t_drop && t(k) >= t_drop
        T(k-1) = T_drop;
    end

    % Sensor (1er orden + ruido)
    dTmeas = (T(k-1) - T_meas(k-1))/tau_s;
    T_meas(k) = T_meas(k-1) + dTmeas*dt + noise_rms*randn*sqrt(dt);

    % Control PI usando la TEMPERATURA MEDIDA
    e = SP(k-1) - T_meas(k);
    u_cont = Kp*e + I;
    u_sat = min(max(u_cont,0),1);
    duty_c(k) = u_sat;

    % Anti-windup condicional
    if (u_cont < 1 || e < 0) && (u_cont > 0 || e > 0)
        I = I + Ki*e*dt;
    end

    % Soft-start: duty_max crece linealmente 0->1 durante t_soft
    if t(k) < t_soft
        duty_max = t(k)/max(t_soft,eps);
    else
        duty_max = 1.0;
    end

    % Slew-rate: limita el cambio de duty por paso
    d_allowed = slewPU * dt;
    dreq = min(duty_c(k), duty_max) - duty(k-1);
    dlim = min(max(dreq, -d_allowed), d_allowed);
    duty(k) = min(max(duty(k-1) + dlim, 0), duty_max);

    % Pulsos reales (gate) para visualizar "prende-apaga"
    gate(k) = double( mod(t(k), Tw) < duty(k)*Tw );

    % Potencia efectiva a la planta
    if usePulses
        Qh = gate(k) * Pmax + eta_h; % excitación por pulsos
    else
        Qh = duty(k) * Pmax + eta_h; % excitación por promedio
    end

    % Dinámica térmica 1 nodo: C dT/dt = Qh - (T - Tamb)/R_loss
    dTdt = ( Qh - (T(k-1) - Tamb)/R_loss ) / C;
    T(k) = T(k-1) + dTdt*dt;
end

```

```

%% ===== Estética de figuras =====
use_black = fig_bg == 'k';
figColor = fig_bg;
axColor = use_black + [1 1 1] + ~use_black + [0 0 0]; % blanco o negro
spColor = use_black + [1 1 1] + ~use_black + [0 0 0]; % setpoint
tRealCol = [0.85 0.10 0.10]; % rojo
tMeasCol = [0.10 0.65 0.90]; % cian
dutyCol = [0.90 0.80 0.10]; % amarillo
gateCol = [0.80 0.80 0.80]; % gris claro

%% ===== Fig 1: Temperatura vs tiempo =====
f1 = figure('Color', figColor, 'Name', 'Fig 1 - Temperatura vs tiempo');
ax1 = gca; ax1.Color = figColor; ax1.XColor = axColor; ax1.YColor = axColor;
plot(t, SP, '--', 'Color', spColor, 'LineWidth', 1.2); hold on;
plot(t, T, 'Color', tRealCol, 'LineWidth', 1.8);
plot(t, T_meas, 'Color', tMeasCol, 'LineWidth', 1.0);
grid on;
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Temperatura [°C]');
title('Temperatura del reactor: SP (punteado), T real (rojo) y T medida (cian)', 'Color', axColor);
legend({'SP', 'T real', 'T medida'}, 'TextColor', axColor, 'Location', 'SouthEast');

%% ===== Fig 2: Control del PLC (solo) =====
f2 = figure('Color', figColor, 'Name', 'Fig 2 - Control del PLC');
ax2 = gca; ax2.Color = figColor; ax2.XColor = axColor; ax2.YColor = axColor;
plot(t, duty+100, 'Color', dutyCol, 'LineWidth', 1.6); hold on;
stairs(t, gate+100, 'Color', [gateCol 0.45], 'LineWidth', 0.9);
grid on; ylim([0 100]);
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Control [%]');
title('Acción del PLC: Duty (%) y Pulsos (gate)', 'Color', axColor);
legend({'Duty %', 'Gate (pulsos %)'}, 'TextColor', axColor, 'Location', 'SouthEast');

%% ===== Fig 3: Control vs T medida =====
f3 = figure('Color', figColor, 'Name', 'Fig 3 - Control vs Temperatura medida');
ax3 = gca; ax3.Color = figColor; ax3.XColor = axColor; ax3.YColor = axColor;
yyaxis left
plot(t, T_meas, 'Color', tMeasCol, 'LineWidth', 1.2); hold on;
ylabel('Temperatura medida [°C]');
yyaxis right
plot(t, duty+100, 'Color', dutyCol, 'LineWidth', 1.6);
ylabel('Duty PWM [%]'); ylim([0 100]);
grid on; xlabel('Tiempo [s]');
title('Relación entre T medida y acción del PLC (Duty %)', 'Color', axColor);
legend({'T medida', 'Duty %'}, 'TextColor', axColor, 'Location', 'SouthEast');

%% ===== Mensajes guía =====
Tmax_theory = Tamb + (Pmax+eta_h)*R_loss;
fprintf('\n=== Sugerencias y datos útiles ===\n');
fprintf('Tmax teórica con 100% PWM: %.1f °C\n', Tmax_theory);
fprintf('Si no se alcanza SP=%.0f °C, aumente Pmax y/o reduzca R_loss.\n', Tset);
fprintf('Soft-start: %.0f s | Slew-rate: %.1f %/s | Tw: %.1f s | Ruido sensor: %.1f °C RMS\n',
        t_soft, slewPct5, Tw, noise_rms);
if useDrop
    fprintf('Evento de caída térmica: t_drop=%.1f s ==> T_drop=%.1f °C\n', t_drop, T_drop);
end

```