

DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA CÁMARA COMBUSTIÓN DE HORNO CON CAPACIDAD DE 13,5M³ ÚTIL, DONDE SE GARANTICE LA CIRCULACIÓN DE AIRE HOMOGÉNEO EN EL INTERIOR, PARA QUEMADO DE MATERIAL ANTIADHERENTE.

JHON JARVY AGUDELO MESA

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS
MEDELLÍN
2024**

DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA CÁMARA COMBUSTIÓN DE HORNO CON CAPACIDAD DE 13,5m³ ÚTIL, DONDE SE GARANTICE LA CIRCULACIÓN DE AIRE HOMOGÉNEO EN EL INTERIOR, PARA QUEMADO DE MATERIAL ANTIADHERENTE.

JHON JARVY AGUDELO MESA

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en sistemas electromecánicos

Asesor Técnico

Karen Lemmel Vélez

Magister en Automatización y Control Industrial

Asesor Metodológico

Arley Fernando Villa Salazar

Magister En Ingeniería Eléctrica

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS
MEDELLÍN
2024**

Contenido

	Pág.
Lista de figuras	6
Lista de tablas	8
Lista de anexos	9
Glosario	10
Resumen	12
Introducción.....	16
1 Planteamiento del problema	18
1.1 Descripción	18
1.2 Formulación	19
2 Justificación	19
3 Objetivos.....	22
3.1 Objetivo general.....	22
3.2 Objetivos específicos	22
4 Marco teórico.....	23
4.1 Hornos industriales	23
4.1.1 Clasificación por categoría de hornos industriales.....	24
4.1.2 Hornos continuos.....	24
4.1.3 Hornos discontinuos.....	24
4.1.4 Clasificación de hornos en diferentes categorías según su diseño y uso específico.	25
4.2 Politetrafluoroetileno (PTFE)	26
4.2.1 Propiedades del Politetrafluoroetileno.....	27
4.2.2 Sistemas de extracción, remoción del PTFE.....	28

4.3	Materiales refractarios y aislantes.....	29
4.3.1	Manta fibra cerámica.....	29
4.3.2	Aplicaciones típicas.....	30
4.3.3	Propiedades físicas.....	31
4.4	Modos de transferencia de calor.....	31
4.4.1	Conducción.....	31
4.4.2	Convección.....	32
4.4.3	Radiación.....	32
4.5	Generalidades de los gases combustibles.....	33
4.5.1	Gases combustibles.....	33
4.5.2	Gas natural (metano).	33
4.5.3	Composición típica del gas natural.....	33
4.5.4	Propiedades físicas.	34
4.6	Principios fundamentales de combustión.....	35
4.6.1	Tipos de combustión.....	36
4.6.2	Propiedades de la combustión.	37
4.7	Quemadores de gas.	40
4.7.1	Tipos de quemadores de gas.....	40
4.8	Automatización y control de procesos.....	42
4.8.1	Sistemas de control.....	42
4.8.2	Controladores industriales.....	43
4.9	Instrumentación y sensores.....	45
4.9.1	Medida de temperatura.	45
4.9.2	Escalas de medición de temperatura.....	47
4.9.3	Métodos de medición de temperatura.....	48
5	Metodología.....	60
5.1	Tipo de proyecto.....	60
5.2	Método.....	60
6	Resultados del proyecto.....	62

6.1	Cámara de combustión del horno.	63
6.2	Ventiladores centrífugos de recirculación del aire.....	64
6.3	Diseño estructural del horno.	65
6.4	Chimenea de evacuación y entrada de aire	69
6.5	Baffles deflectores de distribución de aire	70
6.6	Reforma eléctrica y de instrumentación	71
7	Conclusiones.....	73
8	Bibliografía.....	74
9	Anexos	77

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Horno discontinuo antiguo, para el quemado de material antiadherente (PTFE).	21
Figura 2. Fórmula del monómero de PTFE. (C ₂ F ₄) _n	26
Figura 3. Formación del PTFE.	26
Figura 4. Manta Fibra Cerámica.	30
Figura 5. La llama de precalentamiento	38
Figura 6. Controlador de procesos.....	43
Figura 7. Controlador de temperatura basado en microprocesador	44
Figura 8. Control de un intercambiador de calor	45
Figura 9. Campo de medida de los instrumentos de medida de temperatura.	46
Figura 10. Comparación de las escalas de temperatura.	47
Figura 11. Termómetro de vidrio.	49
Figura 12 Termómetro bimetalico.....	50
Figura 13 Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la fórmula $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$	51
Figura 14. Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385.	52
Figura 15. Continuación valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385.	53
Figura 16. Tipos de sondas y conexiones.	54
Figura 17. Termopar.	54
Figura 18. Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Norma IEC 584-1.	55
Figura 19. Termopar industrial con vaina metálica de protección.	56
Figura 20. Cuadro metodológico.	61
Figura 21 Estado final del horno.	62
Figura 22. Diseño cámara de combustión.	63
Figura 23. Camara de combustión.....	63
Figura 24. Ventilador centrífugo instalado. Tipo BCS.....	64

Figura 25. Esquema ventilador centrifugo.	64
Figura 26. Adecuación horno de quemado PTFE. Vista lateral. Esc: 1.25.	67
Figura 27 Esquema ensamble lamina exterior.....	68
Figura 28. Empalme entre laminas internas.	68
Figura 29. Diseño nueva estructura del horno.....	69
Figura 30. Esquema chimenea de evacuación de gases.....	70
Figura 31 Diseño baffles deflectores de aire.....	71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del PTFE.	28
Tabla 2. Propiedades Físicas manta fibra cerámica.....	31
Tabla 3. Composición típica del gas natural.	34
Tabla 4. Propiedades físicas de los gases combustibles.	34
Tabla 5. Propiedades de combustión de diferentes gases.....	39
Tabla 6. Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados	49
Tabla 7. Tablas de Referencia Internacional Para Termopares Tipo K – Níquel – Cromo / Níquel – Aluminio.....	56
Tabla 8. Especificaciones cámara de combustión.	63
Tabla 9. Especificaciones técnicas de ventiladores.....	65
Tabla 10. Análisis de requisitos del horno.	65
Tabla 11. Controles de proceso, indicadores de funcionamiento y sistema de pulsadores para el control del horno.	72

Lista de anexos

	Pág.
Anexo 1. Compromiso para proyecto de grado.....	77
Anexo 2. Dimensiones generales horno. Vista en planta, elevación y lateral.....	78
Anexo 3. Diagramas eléctricos del horno.....	79
Anexo 4. Ficha técnica manta cerámica.	88

Glosario

Antiadherente: Que impide la adherencia. Aplicado a una sustancia o a un producto.

Baffles deflectores: Los baffles deflectores son dispositivos diseñados para dirigir el flujo de aire caliente de manera controlada dentro del horno. Estos baffles pueden estar hechos de materiales resistentes al calor, como acero inoxidable, y se colocan estratégicamente dentro del horno para optimizar la distribución del calor y mejorar la eficiencia del proceso.

Calor: El calor es el proceso de transferencia de energía que fluye entre un sistema y su ambiente a causa de la diferencia de temperatura entre ellos.

Cámara de combustión: La cámara de combustión es el lugar donde se realiza la combustión del combustible con el comburente, generalmente aire, en el motor de combustión interna.

Control de temperatura: Es un proceso en el cual el cambio de temperatura de un espacio (y de los objetos colectivamente allí dentro), o de una sustancia, se mide o se detecta de otra manera, y el paso de energía térmica dentro o fuera del espacio o sustancia se ajusta para lograr una temperatura deseada.

Degradación térmica: Consiste en la descomposición de las moléculas en fragmentos más pequeños debido a que sus uniones tienen una resistencia limitada, la cual es vencida por el calor.

Energía térmica: La energía térmica o energía calorífica es la parte de la energía interna de un sistema termodinámico en equilibrio que se proporciona a su temperatura absoluta y se incrementa o disminuye por transferencia de energía, generalmente en forma de calor o trabajo, en procesos termodinámicos.

Termómetro: Un termómetro es cualquier dispositivo o sistema que se utiliza para conectar el valor de una de sus variables observables con la temperatura.

Transferencia de calor: La transferencia de calor es la energía intercambiada entre materiales (sólido/líquido/gas) como resultado de una diferencia de temperatura.

Turbulento: En términos de la dinámica de fluidos, turbulencia o flujo turbulento es un régimen de flujo caracterizado por baja difusión de momento, alta convección y cambios espacio-temporales rápidos de presión y velocidad.

Ventiladores de tipo axial: Un ventilador es axial cuando el aire (o gas) entra y sale del ventilador siguiendo una trayectoria paralela al eje de la hélice. En los ventiladores axiales el aire es impulsado por una hélice dotada de un número variable de álabes o palas que están ancladas en un núcleo o cubo que es el elemento que transmite la energía del eje a los álabes.

Resumen

Diseño y automatización de un control de temperatura para la cámara de combustión de horno con capacidad de 13,5m³ útil, donde se garantice la circulación de aire homogéneo en el interior, para quemado de material antiadherente.

El presente proyecto de grado se desarrolló para cumplir una necesidad puntual de la empresa Antyre S.A.S., dedicada a la degradación térmica y aplicaciones de materiales antiadherentes de la ciudad de Medellín, busca corregir y mejorar problemas operativos en su horno discontinuo de convección forzada, utilizado para la remoción del politetrafluoroetileno (PTFE) o material antiadherente. Se opta por reformar el horno existente que estaba provisto de un sistema obsoleto y disfuncional para el control y operación del horno. La reforma se centra en la parte mecánica estructural, instrumentación y control del horno. Se instala una nueva cámara de combustión y se diseña el sistema de recirculación de aire para mejorar la homogeneidad de la temperatura dentro del horno. Se añaden plenums para el direccionamiento del aire y se configura la estructura para tolerar las dilataciones térmicas. Se implementa un falso techo y se instala una chimenea de evacuación de gases. La estructura metálica combina acero al carbón para la parte externa y acero inoxidable 310 para la interna del horno, se utiliza manta cerámica como aislamiento térmico. La cámara de Combustión fabricada en lámina de acero inoxidable 310, con perforaciones de tamaño diferencial a lo largo del cilindro para mejorar la relación de combustión y transferencia de calor en el interior de horno. Se instalaron dos ventiladores centrífugos tipo BCS 200, con motores de inducción con potencia nominal de 4hp cada uno, transmisión por polea y banda. Para una mejor distribución del aire se instalan Baffles Deflectores de Distribución en acero inoxidable 310. El objetivo de estas láminas es direccionar y regular el flujo de aire, obligándolo a ser un flujo transversal ascendente.

Reforma eléctrica y de instrumentación: Se efectúa un Overhaul al quemador de gas natural Baltur, incluyendo cambio de cableado del quemador de gas, adaptación para operación Alto fuego -bajo fuego solo gas, dejando el aire del quemador fijo.

También, se adecua nuevo gabinete eléctrico para la potencia y control del horno, incluyendo las protecciones termomagnéticas, dos variadores de frecuencia para los motores de los

ventiladores de recirculación de aire, tres controles de temperatura Maxthermo 5438, uno para el control alto-bajo del quemador con una alarma por sobre temperatura, los otros dos controles de temperatura para la visualización de la variable en la zona uno y dos del horno.

Se instalaron tres termocuplas tipo K, dos switches de presión de aire para garantizar el debido flujo de aire de cada ventilador de recirculación de aire.

Todas las líneas eléctricas y de instrumentación están debidamente canalizadas con tubería EMT. El sistema cuenta con dos paros de emergencia ubicados, uno en el tablero de control y el otro finalizando del horno.

Logrando así diseñar la automatización y el control de temperatura para la cámara de combustión del horno, obteniendo una estructura más sólida, capaz de resistir las cargas estáticas y dinámicas al cual es sometido. Se evidencio una mejora notable en la trasferencia de calor por medio de los ventiladores de recirculación y los baffles deflectores, ayudando a tener en el interior del horno un flujo de aire caliente transversal ascendente.

Palabras claves: Horno, control de temperatura, diseño, politetrafluoroetileno (PTFE) o material antiadherente, tratamiento térmico, cámara de combustión.

Abstract

Design and automation of a temperature control for the oven combustion chamber with a useful capacity of 13.5m³, where homogeneous air circulation inside is guaranteed, for burning non-stick material.

This degree project was developed to meet a specific need of the company Antyre S.A.S., dedicated to thermal degradation and applications of non-stick materials in the city of Medellín, seeks to correct and improve operational problems in its discontinuous forced convection oven, used for the removal of polytetrafluoroethylene (PTFE) or non-stick material. It was decided to reform the existing oven that was equipped with an obsolete and dysfunctional system for the control and operation of the oven. The reform focuses on the structural mechanical part, instrumentation and control of the oven. A new combustion chamber is installed and the air recirculation system is designed to improve temperature homogeneity inside the oven. Plenums are added to direct the air and the structure is configured to tolerate thermal expansion. A false ceiling is implemented and a gas evacuation chimney is installed. The metal structure combines carbon steel for the external part and 310 stainless steel for the internal part of the oven, ceramic blanket is used as thermal insulation. The combustion chamber made of 310 stainless steel sheet, with differential size perforations along the cylinder to improve the combustion ratio and heat transfer inside the oven. Two BCS 200 type centrifugal fans were installed, with induction motors with a nominal power of 4hp each, pulley and belt transmission. For better air distribution, 310 stainless steel Distribution Deflector Baffles are installed. The objective of these sheets is to direct and regulate the air flow, forcing it to be an upward transverse flow.

Electrical and Instrumentation Reform: An Overhaul is carried out on the Baltur natural gas burner, including changing the wiring of the gas burner, adaptation for High fire - Low fire operation only Gas, leaving the burner air fixed.

Also, a new electrical cabinet is adapted for the power and control of the oven, including thermomagnetic protections, two frequency converters for the air recirculation fan motors, three Maxthermo 5438 temperature controls, one for high-low control of the burner with an over-

temperature alarm, the other two temperature controls for displaying the variable in zone one and two of the oven.

Three type K thermocouples and two air pressure switches were installed to guarantee proper air flow from each air recirculation fan.

All electrical and instrumentation lines are properly channeled with EMT tubing. The system has two emergency stops located, one on the control panel and the other at the end of the oven.

Thus managing to design the automation and temperature control for the furnace combustion chamber, obtaining a more solid structure, capable of resisting the static and dynamic loads to which it is subjected. A notable improvement was evident in heat transfer through the recirculation fans and the deflector baffles, helping to have an ascending transverse hot air flow inside the oven.

Keywords: Oven, temperature control, design, polytetrafluoroethylene (PTFE) or non-stick material, heat treatment, combustion chamber.

Introducción

En el presente proyecto de grado, para optar al título de Tecnólogo en sistemas electromecánicos, de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Se aborda el diseño y la automatización de un control de temperatura para la cámara de combustión de un horno discontinuo con capacidad de 13,5 m³ útil, con el objetivo de garantizar una circulación de aire homogénea en su interior. Este proyecto tiene como finalidad principal optimizar el quemado del material antiadherente utilizado en toda superficie que tenga problemas de producción pegada, dificultad de desmoldeo o que necesite un acabado inerte.

En el planteamiento del problema, se describe la problemática existente en el horno de quemado de material antiadherente, destacando la importancia de un control preciso de la temperatura y una recirculación de aire homogénea para esto es necesario un nuevo diseño mecánico para obtener resultados consistentes y de alta calidad. Además, se formula el problema a abordar, definiendo los objetivos generales y específicos que guiarán el desarrollo del proyecto.

La justificación del proyecto, se basa en la necesidad de mejorar el proceso de quemado de material antiadherente de la empresa **AntyRe S.A.S**, con el fin de garantizar la satisfacción del cliente. Se destacarán los beneficios potenciales de la automatización y el control de temperatura, como la reducción de costos, la optimización de los recursos y la mejora en la productividad.

En el apartado de referentes teóricos, se analizará la historia y las propiedades del politetrafluoroetileno (PTFE), utilizado en los recubrimientos de utensilios de cocina. Además, se revisarán los conceptos relacionados con los hornos industriales, se dará una explicación y se nombra las características de los materiales refractarios y aislantes, los modos básicos de transferencia de calor, los principios fundamentales de la combustión y los tipos de quemadores de gas. También se abordará el tema de la automatización y el control de procesos, haciendo énfasis en la importancia del control de temperatura y la instrumentación requerida para el horno a desarrollar.

Posteriormente, se presenta la descripción técnica del proyecto, detallando la estructura del horno, la cámara de combustión, los ventiladores de recirculación, la chimenea de evacuación de

gases de combustión, así como los baffles deflectores de distribución, se detallará la parte de instrumentación y control. Estos elementos constituyen los componentes principales del sistema que permitirá garantizar la circulación homogénea de aire en la cámara de combustión y cámara de quemado del horno.

La metodología utilizada en este proyecto se describe detalladamente, destacando el tipo de proyecto, el método empleado, los instrumentos de recolección de información y los recursos requeridos para el cumplimiento del objetivo general. Por último, se presentará las conclusiones y los anexos del proyecto.

En cuanto a los resultados de la propuesta, se presentarán los posibles logros y beneficios obtenidos al implementar el sistema de control de temperatura automatizado. Se espera obtener una mayor precisión en el control de la temperatura, una distribución uniforme gracias a los baffles deflectores de aire caliente en la cámara de quemado y una mejora significativa en la transferencia térmica en el interior del horno.

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción

En la compañía **AntyRe antiadherentes y recubrimientos S.A.S** radicada en la ciudad de Medellín, se dedicada a la aplicación y degradación térmica de materiales antiadherentes; a toda superficie que tengan problemas de producción pegada, dificultades de desmoldeo, que necesiten resistir temperaturas hasta 260 °C, que requieran capacidades dieléctricas, rechacen el agua y el aceite o que necesiten un acabado inerte (AntyRe, 2019b)

La empresa cuenta con un horno destinado a la remoción o degradación térmica de materiales antiadherentes. El horno es de tipo discontinuo de convección forzada y como fuente de generación de calor; se realiza mediante la combustión de gas natural, mediante un quemador de funcionamiento On/ Off. El horno presenta problemas operativos, relacionados con:

- Falta de recirculación de aire en la cámara de quemado del material
- Carece de una cámara de combustión aislada de la cámara de quemado, al no tener esta cámara de quemado, la llama que emite el quemador, da directamente sobre las piezas, provocando deformaciones por exceso de temperatura.
- El horno existente cuenta con dos ventiladores de tipo axial, los cuales presentan altas vibraciones, por falta de un correcto balanceo; estas vibraciones generan fatiga en la parte estructural del horno, tanto en la base del motor, como en las uniones de los paneles metálicos. Afectando su rendimiento y durabilidad.
- Los ventiladores de recirculación instalados impulsan el aire de forma paralela al eje del rotor, lo que no es óptimo para un horno de remoción de material antiadherente, ya que se necesita en el interior de la cámara un flujo de aire turbulento, para mayor transferencia térmica.
- En la parte eléctrica de control y potencia tanto del quemador de gas, como de la instrumentación del horno presenta anomalías de lógica cableada, está deteriorado por el tiempo de funcionamiento.
- Los motores de los ventiladores de recirculación de aire, son de frecuencia fija, ya

que no cuentan con variadores de velocidad. Al implementar la regulación de frecuencia, aumenta el control de distribución del flujo de aire caliente en las zonas internas del horno.

1.2 Formulación

¿Cómo diseñar un sistema de control de temperatura para la cámara de combustión de un horno con un volumen útil de $13,5\text{m}^3$, que garantice una circulación de aire homogénea en el interior para el quemado de material antiadherente, abordando los problemas operativos identificados como falta de recirculación de aire, carencia de una cámara de combustión aislada, vibraciones en los ventiladores, inadecuada dirección del flujo de aire y anomalías en el sistema eléctrico?

2 Justificación

La justificación del proyecto "Diseño y automatización de un control de temperatura para la cámara combustión de horno con capacidad de $13,5\text{m}^3$ útil, donde se garantice la circulación de aire homogéneo en el interior, para quemado de material antiadherente" se fundamenta en diversas razones que resaltan su importancia y pertinencia:

1. Mejora de la calidad del producto final:

La automatización y control preciso de la temperatura en la cámara de combustión y cámara del procesamiento de los materiales del horno garantiza condiciones óptimas para el quemado de material antiadherente, lo que conduce a una mejora significativa en la calidad y uniformidad de la remoción aplicados a los diferentes utensilios de cocina.

2. Incremento de la eficiencia y productividad:

Al optimizar el proceso de quemado mediante la automatización y control de temperatura, se reducirán los tiempos de producción y los desperdicios asociados a recubrimientos defectuosos, lo que se traducirá en una mayor productividad en la planta de fabricación.

3. Cumplimiento de estándares de calidad:

El diseño y automatización de un control de temperatura permitirá asegurar que los recubrimientos antiadherentes aplicados cumplan con los estándares de calidad establecidos por la industria, garantizando la satisfacción del cliente y la competitividad en el mercado.

4. Reducción de costos operativos:

La implementación de un sistema automatizado de control de temperatura puede contribuir a la reducción de costos operativos a largo plazo al minimizar el consumo de energía y los recursos utilizados en el proceso de quemado, así como al disminuir los retrabajos y desperdicios asociados a productos no conformes.

Con base en estas premisas, se decide llevar a cabo un diseño centrado en mejorar el sistema. Esto incluye el rediseño e instalación mecánica de la cámara de combustión y cámara de quemado del material antiadherente, garantizando una separación de la llama a las piezas a tratar.

El diseño e instalación de cámara, mejorando la homogeneidad por convección de la temperatura dentro del horno, la optimización del control de la temperatura en la cámara de combustión, el diseño e instalación del gabinete de potencia y control del horno.

La automatización del control de temperatura garantiza que se alcance la temperatura adecuada y se mantenga de manera más uniforme, separando la cámara de combustión con la cámara de quemado, para este proceso se diseña e instala un falso fondo con la cámara de quemado del material antiadherente, diseñando e instalando un sistema de recirculación de aire en el interior del horno esto logra aumentar la eficiencia y seguridad del proceso de quemado.



Figura 1. Horno discontinuo antiguo, para el quemado de material antiadherente (PTFE).
Fuente: Propia del autor.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un control de temperatura para la cámara de combustión del horno de tipo discontinuo, con un volumen útil de $13,5\text{m}^3$ donde se garantice la circulación de aire homogénea en el interior para el quemado de materiales antiadherentes.

3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar una cámara de combustión optimizada para cumplir con los requisitos energéticos del horno y las demandas específicas del proceso de quemado de material antiadherente, asegurando una transferencia de calor eficiente y una combustión adecuada.
2. Mejorar el sistema de recirculación de aire mediante la instalación de dos ventiladores centrífugos y baffles deflectores para homogeneizar la temperatura en el interior del horno, garantizando condiciones óptimas para la degradación térmica del material.
3. Optimizar la configuración estructural del horno para la instalación de plenums que direccionen adecuadamente el aire y los gases, mejorando el flujo en la cámara de combustión y la zona de trabajo, lo que contribuirá a la uniformidad del proceso de quemado.

4 Marco teórico

Diseño y automatización de un control de temperatura para la cámara de combustión de horno con capacidad de 13,5m³ útil, donde se garantice la circulación de aire homogéneo en el interior, para quemado de material antiadherente. Requiere una comprensión del proceso y de los elementos relacionados con el mismo; en tal sentido es necesario e importante fundamentar teóricamente dichos procedimientos y componentes a fin de obtener un panorama general que sustente el desarrollo del proyecto.

4.1 Hornos industriales

Los hornos industriales son equipos utilizados en diversos procesos de producción para realizar operaciones de calentamiento, fundición, secado, tratamiento térmico, entre otros. Están diseñados para manejar grandes volúmenes de materiales y pueden operar a temperaturas muy altas, dependiendo de la aplicación específica.

Estos hornos se utilizan en una amplia gama de industrias, incluyendo la metalurgia, la cerámica, la industria alimentaria, la fabricación de vidrio, la industria química, entre otras. Pueden variar en tamaño y diseño según los requisitos de la aplicación y los materiales que se están procesando.

Los hornos industriales pueden funcionar mediante diferentes tipos de energía, como electricidad, gas, combustibles líquidos, o energía solar, y pueden tener características específicas como control de temperatura, sistemas de ventilación, aislamiento térmico.

Los hornos a nivel industrial que trabajan a temperaturas menores de 600 grados centígrados, se les conoce como hornos de baja temperatura, sus principales aplicaciones son los procesos de secado y polimerización. (Cantos & Esteban, 2019)

En el presente trabajo, se dará énfasis en el estudio de los hornos por convección forzada, en los que se utiliza un ventilador centrífugo, aprovechando el movimiento del aire, e incrementando

el coeficiente de transferencia de calor por convección y, por tanto, disminuye el tiempo de remoción por degradación térmica del PTFE.

El calor se genera en hornos o calentadores al quemar un combustible como carbón mineral, combustóleo o gas natural, o bien, al pasar una corriente eléctrica por un calentador de resistencia. La electricidad rara vez se usa para fines de calentamiento, ya que su costo unitario es mucho más elevado. El calor generado es absorbido por el medio en que se encuentra en el

horno y sus superficies, lo cual causa una elevación en la temperatura por encima de la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura produce la transferencia de calor del medio caliente hacia el ambiente y el aislamiento reduce la pérdida de calor y, de este modo, ahorra combustible y dinero. (Yunus A, 2007)

4.1.1 Clasificación por categoría de hornos industriales.

Los hornos industriales se pueden clasificar en dos categorías principales: continuos y discontinuos.

4.1.2 Hornos continuos.

Son aquellos en los que la producción se realiza de manera constante y sin interrupciones durante un período prolongado de tiempo. Estos hornos se utilizan comúnmente en la producción en masa de productos como alambre, tuberías, vidrio y acero.

4.1.3 Hornos discontinuos.

Son aquellos en los que la producción se realiza en ciclos y se detiene periódicamente para cargar o descargar el horno. Estos hornos se utilizan comúnmente para procesos como la fundición, el tratamiento térmico, el revenido y remoción de material antiadherente.

4.1.4 Clasificación de hornos en diferentes categorías según su diseño y uso específico.

- **Hornos de cámara por recirculación.**

Son los más comunes y en este caso es el propuesto para el diseño y fabricación, dando cumplimiento al objetivo general del proyecto.

Dentro de este tipo de hornos industriales se encuentran los que trabajan a temperaturas de operación bajas, por debajo de los 600°C, en su mayoría este tipo de hornos constan de un sistema de recirculación de aire. El tener implementado este sistema se genera un ahorro de energía y una uniformidad de la temperatura dentro del mismo

Se utilizan para diversos procesos industriales, como la fundición de metales, el tratamiento térmico de piezas metálicas, el secado de materiales y el horneado de alimentos.

- **Hornos de crisol.**

Se utilizan para fundir metales y aleaciones a altas temperaturas.

- **Hornos rotatorios.**

Se utilizan para procesos continuos de cocción, secado y calcinación de materiales a granel.

- **Hornos de recocido.**

Se utilizan para el tratamiento térmico de metales y aleaciones a temperaturas muy elevadas.

- **Hornos de temple.**

Se utilizan para endurecer metales y aleaciones mediante un proceso de enfriamiento rápido.

- **Hornos de revenido.**

Se utilizan para reducir la dureza de los metales después de un proceso de endurecimiento.

- **Hornos de fusión.**

Se utilizan para fundir metales y aleaciones en grandes cantidades. (Cantos & Esteban, 2019)

4.2 Politetrafluoroetileno (PTFE)

El material PTFE, conocido químicamente como politetrafluoroetileno, y coloquialmente como teflón, es un polímero similar al polietileno, en el que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de flúor. La fórmula química del monómero, tetrafluoroeteno, es $\text{CF}_2=\text{CF}_2$. La fórmula del monómero se muestra en la Figura 2 (Guerrero-Vacas, 2013)

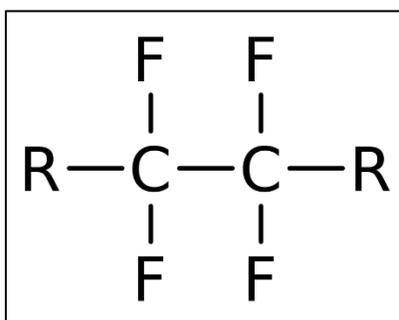


Figura 2. Fórmula del monómero de PTFE. $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$

Fuente: Extraído de (Guerrero-Vacas, 2013)

La polimerización cientos de veces de este monómero produce el polímero conocido como politetrafluoroetileno, PTFE ver Figura 3.

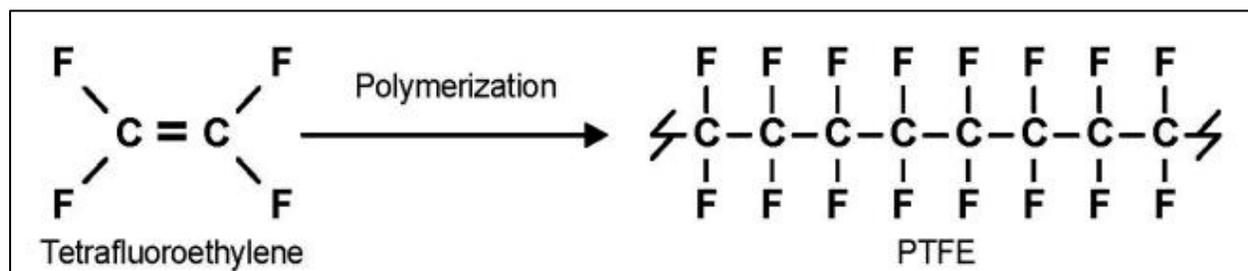


Figura 3. Formación del PTFE.

Fuente: Extraído de (Guerrero-Vacas, 2013)

El PTFE está formado en su totalidad por cadenas de macromoléculas sin ramificar, con un grado de polimerización bastante elevado. Los enlaces FC son tan fuertes que es muy difícil romperlos. Por otra parte, la estructura molecular es completamente simétrica. Debido al diámetro de los átomos de flúor, estos crean impedimentos estéricos entre ellos, por lo que deben orientarse en el espacio en forma de espiral. Así, los átomos de flúor rodean completamente los átomos de carbono que quedan en el interior de la espiral.

De esta estructura derivan las propiedades más importantes del teflón; se trata pues, de un plástico semi cristalino, no polar, con un grado de cristalinidad muy elevado.

Se trata de un plástico especial que sólo se destina a elevadas temperaturas. El polímero que contiene hasta un 40% de materiales aditivos se denomina compuesto de PTFE.

(«Politetrafluoroetileno», 2024)

4.2.1 Propiedades del Politetrafluoroetileno

La principal propiedad de este material es, que es prácticamente inerte, no reacciona con otras sustancias químicas excepto en situaciones muy especiales. Esto se debe básicamente a la protección de los átomos de flúor sobre la cadena carbonada. Tiene un muy bajo coeficiente de rozamiento y gran impermeabilidad, manteniendo además sus cualidades en ambientes húmedos («Politetrafluoroetileno», 2024).

Es también un gran aislante eléctrico y sumamente flexible, no se altera por la acción de la luz y es capaz de soportar temperaturas desde $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3 K) hasta $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (543 K). Desde el punto de vista térmico las propiedades del teflón muestran que es excepcionalmente estable tanto en aire como en atmósferas inertes sin degradación ni descomposición hasta 440°C . Por ello se puede utilizar de forma continua hasta los $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ reteniendo sus propiedades mecánicas hasta un 50% tras 20 000 horas. Su cualidad más conocida es la antiadherencia. Ver las propiedades del politetrafluoroetileno en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1.
Propiedades del PTFE.

Módulo de Young:	0,058 – 0.0801 *10 ⁶ Psi.
Resistencia térmica	-200 y +260°C
Calor específico	0.232 - 0.26 BTU/lb * °F
Densidad:	2,2 g/cm ³
Punto de fusión:	327 °C
Denominación de la IUPAC:	poly(1,1,2,2-tetrafluoroethylene)
Punto de fusión	599 – 642 °F, Glass point 242-266 °F,

Fuente: Extraído de <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/5482>

4.2.2 Sistemas de extracción, remoción del PTFE.

La industria durante mucho tiempo ha dedicado grandes esfuerzos a la extracción de todo tipo de recubrimientos y a la preparación de la superficie de forma adecuada para un tratamiento posterior. Entre los procedimientos más comunes se encuentran:

- Abrasión mecánica: granallado, chorreado, cepillado, lijado, pulido.
- Uso de calor: pirólisis, degradación térmica, combustión en atmósferas inertes o pobres en oxígeno.
- Procedimientos químicos: limpieza por emulsión, por disolventes, desengrasado por vapor, limpieza alcalina, limpieza ácida.
- Abrasión por chorro de agua a alta y ultra alta presión.
- Chorro de gas: nitrógeno.
- Ultrasonidos.
- Abrasión con hielo seco o criogénica.
- Lecho fluidizado.

Otros procedimientos. Estos modos son utilizados en muchas de las ocasiones de forma combinada, Así, por ejemplo, es común una degradación térmica del recubrimiento, una posterior abrasión mecánica para terminar con un tratamiento químico de acabado de la superficie. En definitiva, los procesos industriales reales rara vez resuelven la extracción de un recubrimiento

con una única de las técnicas descritas. La selección de un procedimiento de extracción suele ser una cuestión económica que debe valorar todos los aspectos en juego, desde la utilización y mantenimiento de equipos y medios humanos, la cantidad de consumibles necesario y el cumplimiento de la normativa ambiental, entre otros. (Guerrero-Vacas, 2013)

4.3 Materiales refractarios y aislantes

Su objetivo es aislar el interior de los hornos con un doble propósito:

- Reducir las pérdidas de calor.
- Conseguir unas condiciones ambientales en el exterior suficientemente aceptables. La capa interior del aislante térmico debe ser capaz de:
 - Resistencia térmica: soportar el ambiente interior (humos, aire en recirculación, gases reductores, entre otros).
 - Resistencia química: contener sin reacción química, en términos generales, metales y no metales fundidos, a alta temperatura, entre otros. Dependiendo de la temperatura máxima que deban soportar, se tienen:
 - Productos calorífugos (hasta 423,15 K): la humedad afecta mucho a sus propiedades aislantes.
 - Productos aislantes (hasta 1273,15 K): hay muchos tipos, como la diatomita, el carbonato de magnesio, las lanas minerales, la vermiculita, la arcilla y perlita expandida y el silicato cálcico.
 - Productos refractarios (hasta 1773,15 K): no tienen un punto de fusión determinado, sino que se funden en un rango de temperaturas (fusión pastosa). Entre ellos están los silicatos de aluminio, las arcillas refractarias, los hidratos y óxidos de aluminio y el carburo de silicio.
 - Fibras cerámicas (hasta 1773,15 K): son capaces de soportar la acción directa de la llama.

4.3.1 Manta fibra cerámica

Es producida a partir de Caolín, una arcilla sílico-aluminosa de extracción natural. Las fibras sílico-aluminosas resultantes de alta calidad, son dispuestas en arreglos de capas con aire en una

matriz continua, mecánicamente cosida para proporcionarle integridad a la superficie y adicionarle resistencia a la tensión. Disponible en una amplia variedad de densidades y dimensiones. La manta ofrece excelente manejabilidad y estabilidad a alta temperatura lo que le permite ajustarse a diversas aplicaciones como aislante de respaldo o directamente sobre la cara caliente de hornos rotatorios, tubería y otros equipos que exigen ahorro de energía calorífica. (*ING-FT-101-Manta-fibra-ceramica-SIS-1260°C.pdf, 2023.*)

Una manta cerámica es un material aislante térmico hecho de fibras cerámicas que se entrelazan para formar una estructura flexible similar a una manta. Estas mantas cerámicas tienen una alta resistencia al calor y son capaces de soportar temperaturas extremadamente altas, lo que las hace ideales para una variedad de aplicaciones industriales donde se requiere aislamiento térmico.



Figura 4. Manta Fibra Cerámica.

Fuente: Extraído de <https://sissa.com.co/descargas-y-documentos/>

4.3.2 Aplicaciones típicas.

Se aplica en todo tipo de procesos donde las altas temperaturas son el factor crítico tales como: hornos, exostos, chimeneas, calderas, juntas de dilatación, empaquetaduras para planchas no estándar, hand holes.

- Algunos usos de la manta: Hornos que operan a altas temperaturas, hornos de laboratorio, revestimientos como back-up de refractarios, sellos y recubrimientos de compuertas de hornos, revestimientos en hornos de recalentamiento, recubrimiento

para ductos de vapor, mantas para alivio de tensiones o Aislamiento de turbinas a gas y vapor reutilizables, empaques para juntas de expansión Protección contra fuego.

4.3.3 Propiedades físicas

A continuación, Tabla 2, se describe las propiedades físicas de la manta fibra cerámica.

Tabla 2.

Propiedades Físicas manta fibra cerámica.

Color	Blanco
Densidad (Kg/m ³)	64 - 168
Temperatura máxima. (°C)	1260
Punto de fusión	1760
Límite de uso continuo, hasta °C	1100
% Contracción a 1000 °C	24 horas <-3%

Fuente: Extraído de <https://sisssa.com.co/wp-content/uploads/2023/10/ING-FT-101-Manta-fibra-ceramica-SIS-1260%C2%B0C.pdf>

4.4 Modos de transferencia de calor

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. Enseguida se da una breve descripción de cada modo. (Yunus A, 2007)

4.4.1 Conducción

Transferencia de calor en el cual la energía térmica se transfiere desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura a través de un material o sustancia sin movimiento macroscópico de la sustancia misma. Esto se debe a la transferencia de energía entre las partículas que componen el material, donde las partículas de alta energía ceden parte de su energía a las partículas de baja energía. Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. (Yunus A, 2007). La conducción es importante en muchos procesos industriales, como la

transferencia de calor en hornos, intercambiadores de calor, y en la fabricación de materiales compuestos.

4.4.2 Convección

El modo de transferencia de calor por convección en realidad consiste en dos mecanismos que operan de manera simultánea. El primero es la transferencia de energía generada por el movimiento molecular, es decir, el modo conductivo. Superpuesta a este modo se encuentra la transferencia de energía por el movimiento macroscópico de fracciones de fluido. El movimiento de fluido es un resultado de fracciones de fluido, donde cada una consiste en una gran cantidad de moléculas, que se mueven por la acción de una fuerza externa. Esta fuerza extraña puede ser el resultado de un gradiente de densidad, como en la convección natural, o por una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador, o posiblemente por una combinación de las dos.(Kreith, Manglik, & Bohn, 2012).

La convección se clasifica como convección natural (o libre) y forzada, dependiendo de la manera en que se inicia el movimiento del fluido. En la convección forzada se obliga a que el fluido fluya sobre una superficie o en un tubo por medios externos, como una bomba o un ventilador. En la convección natural, cualquier movimiento del fluido es causado por medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta como la subida del fluido caliente y la caída del fluido frío. La convección también se clasifica como externa e interna, dependiendo de si se obliga al fluido a fluir sobre una superficie o en un tubo.(Yunus A, 2007)

4.4.3 Radiación

Transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. En este proceso, la energía se emite en forma de radiación electromagnética por un cuerpo caliente y se absorbe por

otro cuerpo más frío. La radiación térmica puede ser emitida por cualquier objeto cuya temperatura sea mayor que el cero absoluto y se mueve a través del espacio a la velocidad de la luz. Es importante destacar que la radiación térmica puede ser tanto visible como invisible al ojo humano, y su intensidad depende de la temperatura del objeto emisor y de la distancia entre el objeto emisor y el receptor.

4.5 Generalidades de los gases combustibles

4.5.1 Gases combustibles

Los gases combustibles, con dos excepciones (hidrógeno y monóxido de carbono) los gases combustibles son hidrocarburos o mezclas de hidrocarburos que arden en aire u oxígeno.

4.5.2 Gas natural (metano).

El gas natural está compuesto principalmente de metano, es un energético que se extrae del subsuelo, es incoloro, inoloro y para ser detectado se le agrega un odorizante llamado mercaptano. Su composición, y por tanto sus propiedades de combustión, varían de un yacimiento a otro. En la tabla 3 se muestra la composición de gases naturales en Colombia (Vanti S.A. ESP., 2024). Se utiliza como combustible para usos domésticos e industriales y como materia prima en la fabricación de plásticos, fármacos y tintes, además de su gran poder calorífico, su combustión es regulable y produce escasa contaminación.

4.5.3 Composición típica del gas natural

En la siguiente Tabla 3 tenemos los porcentajes en volumen, los compuestos químicos constituyentes del gas natural.

Tabla 3.

Composición típica del gas natural.

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH ₄	81.86
Etano	C ₂ H ₆	11.61
Propano	C ₃ H ₈	1.92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0.23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0.22
Nitrógeno	N ₂	0.90
Dióxido de carbono	CO ₂	3.18

Fuente: Extraído de <https://www.grupovanti.com/conocenos/quienes-somos/sobre-el-gas-natural>

4.5.4 Propiedades físicas.

En la Tabla 4 se muestran algunas propiedades físicas importantes de los gases combustibles.

La razón de la importancia de estas propiedades se explica a continuación.

Tabla 4.

Propiedades físicas de los gases combustibles.

Nombre	Fórmula	Punto de ebullición (°C) a 1 bar	Temp. Crítica (°C)	Presión de vapor (bar) a 20 °C	Densidad (kg/m ³) a 15 C y 1 bar	Densidad relativa (aire=1) a 15°C y 1 bar
Acetileno	C ₂ H ₂	-84	35	43,2	1,09	0,91
Metilacetileno	C ₃ H ₄	-23	129	5	1,75	1,46
Etileno	C ₂ H ₄	-104	10		1,18	0,98
Propileno	C ₃ H ₆	-48	92	10,2	1,78	1,48
Hidrógeno	H ₂	-253	-240		0,08	0,07
Propano	C ₃ H ₈	-42	97	8,3	1,88	1,55
Metano	CH ₄	-162	-82		0,67	0,56

Fuente: Extraído de (AGA AB, 1993)

- **Punto de ebullición:**

El punto de ebullición de todos los gases de la tabla está muy por debajo de la temperatura ambiente. Esto quiere decir que los gases estarán en estado gaseoso a temperatura ambiente y a la presión atmosférica.

- **Temperatura crítica:**

Muchos gases pueden pasar al estado líquido sin necesidad de que sean enfriados hasta el punto de ebullición. Esto se logra aumentando la presión, de manera que el punto de ebullición se eleva. Sin embargo, para cada gas existe una temperatura por encima de la cual, no importando la presión, el gas nunca podrá ser licuado. La presión que produce la condensación a la temperatura crítica recibe el nombre de **presión crítica**.

- **Presión de vapor:**

La presión de vapor determina la presión del gas en el cilindro para aquellos gases que se condensan a temperatura ambiente. Es la mayor presión que puede obtenerse cuando existe un espacio por encima del líquido que está saturado con gas. Si la presión aumenta por encima de esa presión, parte del gas se condensa, provocando una disminución de presión. De esta manera se establece un equilibrio entre las fases líquida y gaseosa. De la misma manera, cuando se extrae gas del recipiente se vaporiza más líquido, estableciéndose así el equilibrio. La presión de vapor del gas varía con la temperatura.

- **Densidad:**

La densidad en nuestro caso la entendemos como la del gas en expansión a presión atmosférica. Esto es importante por razones de seguridad que se discutirán en capítulo aparte.

4.6 Principios fundamentales de combustión

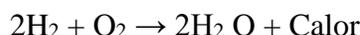
La combustión es una reacción química exotérmica que se produce entre un combustible y un oxidante, generalmente el oxígeno del aire, liberando energía en forma de calor y luz. Durante la combustión, los átomos de los combustibles se combinan con los átomos del oxidante, lo que genera productos de la combustión como dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases dependiendo del combustible y las condiciones de combustión. La combustión es un proceso fundamental en la producción de energía, la calefacción, la cocina, la industria y el transporte.

La combustión es la oxidación rápida de un combustible. La reacción se acompaña de ese fenómeno físico visible que se llama "llama" y por la generación de energía que se conoce como "calor". El carbono se combina con el oxígeno para formar carbono dióxido de carbono, un gas no tóxico, y libera calor de acuerdo con la siguiente fórmula, Ecuación 1



Ecuación 1.

Así mismo, el hidrógeno se combina con el oxígeno para formar vapor de agua, con la consecuente producción de calor, según la siguiente fórmula, Ecuación 2



Ecuación 2.

Es importante señalar que el combustible y el oxígeno se combinan en proporciones específicas y bien definidas. Las cantidades de oxígeno y combustibles en la mezcla están en proporción perfecta o "estequiométrica", cuando permiten la oxidación completa del combustible sin residuos de oxígeno. (Riello S. p. A, 2001).

4.6.1 Tipos de combustión.

- **Combustión estequiométrica.**

Es un proceso de combustión completo en el que se utiliza la cantidad exacta de oxígeno requerida para quemar completamente un combustible. En esta reacción química, se asegura que todos los reactivos se hayan consumido completamente sin exceso de ningún reactivo. Como resultado, no se produce ningún residuo de combustión, lo que significa que todo el combustible se ha convertido en productos de combustión como dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). La combustión estequiométrica es a menudo considerada como la forma más eficiente de combustión, ya que produce la mayor cantidad de calor y energía para una cantidad determinada de combustible.

- **Combustión completa.**

También conocida como oxidación completa, es la combustión que ocurre cuando una cantidad suficiente de oxígeno está presente para reaccionar completamente con todo el combustible. El resultado es dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y energía en forma de calor.

- **Combustión incompleta.**

También conocida como oxidación incompleta, es la combustión que ocurre cuando no hay suficiente oxígeno para reaccionar completamente con el combustible. Como resultado, se producen gases tóxicos como monóxido de carbono (CO), partículas de carbono, hidrógeno,

4.6.2 Propiedades de la combustión.

- **La llama de precalentamiento.**

La función principal de la llama de precalentamiento en la mayoría de los procesos con llama es la de conseguir un calentamiento localizado rápido. Esto impone demandas sobre las propiedades del gas a ser usado.

En la llama de precalentamiento, un gas combustible arde en oxígeno generando calor. La llama consiste de dos zonas de combustión, una externa y una interna, ver Figura 5.

- **Etapas de la llama de combustión.**

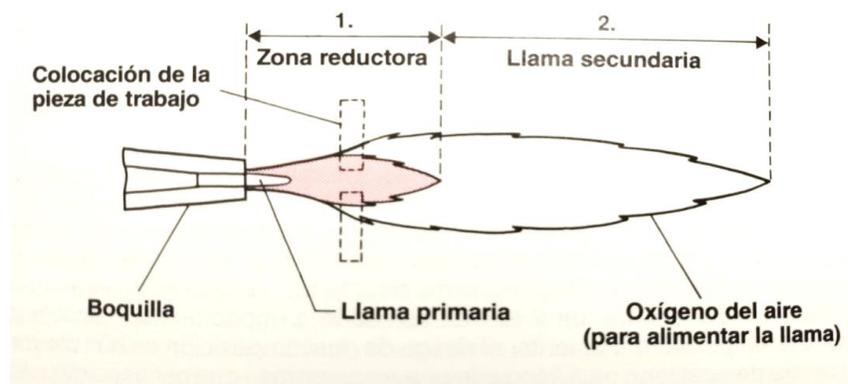


Figura 5. La llama de precalentamiento

Fuente: Extraído de (AGA AB, 1993).

La zona interna, llamado como interno o llama primaria, es caliente y luminosa. Allí, en un principio, el gas combustible se descompone en carbono e hidrógeno (C y H₂). En la superficie de la llama primaria, el carbono se quema, formándose monóxido de carbono (CO); en el proceso se genera calor.

En el proceso de descomposición del gas combustible puede generarse o consumirse calor, dependiendo del tipo de gas. Un gas con un calor de formación positivo, ver Tabla 5, emite calor durante la descomposición, mientras que un gas con un calor de formación negativo absorbe calor. El acetileno es un ejemplo de gas combustible que emite una gran cantidad de calor durante la descomposición. Esto causa un calentamiento del gas, con lo que el proceso de combustión se acelera. La llama primaria es más pequeña, pero más concentrada y caliente.

Las temperaturas que se alcanzan en la llama primaria son tan altas que algunas de las moléculas del gas (las moléculas de los productos de la combustión) están en estado disociado. La disociación limita la temperatura en la llama. En la superficie de la pieza de trabajo donde la temperatura es menor, los átomos de gas se recombinan y emiten calor. Parte de este calor se transfiere a la pieza de trabajo. (AGA AB, 1993)

Tabla 5.
Propiedades de combustión de diferentes gases.

Nombre	Calor de formación MJ/kg	Valor de calorífico (bajo).		Temp. de llama norma l °C	Relación mezcla m3 oxígeno / m3 de gas combustible	
		MJ/kg gas Combustible	MJ/m ³ gas Combustible		Llama normal	Estequio- métrico
Acetileno	8,7	48,2	56,5	3106	1,1	2,5
Metilacetileno	4,6	46,2	82,2	2984	2,3	4
Etileno	1,9	47,1	59,5	2902	2	3
Propileno	0,5	45,8	87,6	2872	3,1	4,5
Hidrógeno	0	120	10,8	2834	0,4	0,5
Propano	-2,4	46,4	93,2	2810	4	5
Metano	-4,7	50	35,9	2770	1,8	2

Fuente: Extraído de (AGA AB, 1993)

La zona externa de combustión recibe el nombre de zona envolvente o llama secundaria. En esta zona se produce la combustión de monóxido de carbono e hidrógeno (CO y H₂), formándose como productos finales de la combustión dióxido de carbono y vapor de agua (CO₂ y H₂O). Una parte importante del oxígeno consumido en la combustión proviene del aire circundante.

Al calor total que es liberado durante la combustión se le llama **valor calorífico bajo**, ver Tabla 5. Existe también un valor calorífico alto. Este incluye el calor generado durante la condensación del vapor de agua, esto es, el calor latente de vaporización. En los procesos estudiados aquí, los productos de la combustión se generan a tan alta temperatura que el agua producida está presente en forma de vapor. Esto significa que no puede contarse en el total con el calor latente de evaporación, y por esta razón se usa el valor calorífico bajo

En soldadura y corte, donde se desea precalentamiento localizado, la llama primaria es la de mayor importancia. Por otro lado, en los procesos de calentamiento, se considera el calor total de la llama.

4.7 Quemadores de gas.

Un quemador de gas es un dispositivo utilizado en procesos industriales y domésticos que se encarga de transformar la energía química del gas en calor mediante la combustión. Consiste en un sistema de suministro de gas y aire, una cámara de combustión y una boquilla por donde sale el gas. El gas es mezclado con el aire para crear una mezcla adecuada para la combustión, que se quema en la cámara de combustión para producir calor.

4.7.1 Tipos de quemadores de gas.

Los tipos de quemadores de gas se puede clasificar según el combustible que usan, estos son:

- **Según el combustible que usa.**
 - **Quemadores de gas natural o GLP**

Diseñados específicamente para trabajar con gas natural, el cual se quema de forma limpia y eficiente, produciendo menos emisiones de gases de efecto invernadero y residuos. Cuando queman GLP son similares a los quemadores de gas natural, pero hay cambios de difusores, boquillas en el cabezal de combustión del quemador, y se utiliza en áreas donde no hay acceso al gas natural.
 - **Quemadores de ACPM.**

Diseñados para trabajar con gasóleo, un combustible líquido derivado del petróleo. Son comunes en sistemas de calefacción y en algunas aplicaciones industriales.
 - **Quemadores duales (GN- ACPM).**

Son aquellos que pueden funcionar con dos tipos de combustibles diferentes, normalmente gas natural y ACPM, de manera que el usuario puede seleccionar el tipo de combustible a utilizar en función de la disponibilidad, costos o preferencias. Estos quemadores permiten una mayor flexibilidad en la operación de los equipos de combustión.

- **Según tipo de operación.**

- **Quemadores de gas ON- OFF.**

Estos quemadores solo pueden funcionar en dos modos: encendido o apagado. Es decir, no tienen la capacidad de regular la potencia de salida del quemador, por lo que suelen ser menos eficientes en términos de consumo de combustible y emisiones de contaminantes. Estos quemadores suelen utilizarse en aplicaciones de menor exigencia y en equipos de calefacción o calentamiento de menor tamaño.

- **Quemadores de gas dos llamas progresivas.**

También conocidos como quemadores de dos etapas, son aquellos que tienen la capacidad de ajustar su potencia de fuego en dos niveles diferentes: alto y bajo. Estos quemadores se utilizan en aplicaciones donde se requiere una modulación de la temperatura de la llama para adaptarse a las necesidades de la aplicación. En el nivel alto, el quemador funciona a plena capacidad, mientras que, en el nivel bajo, la potencia de la llama se reduce para mantener la temperatura deseada con mayor precisión. Esta capacidad de modulación permite un mayor control de la temperatura y la eficiencia energética del proceso.

- **Quemadores de gas modulado.**

Son aquellos que tienen la capacidad de ajustar su capacidad de combustión de forma automática, según las necesidades de calor requeridas en el proceso industrial. Esto se logra a través de un controlador que recibe información de sensores de temperatura y ajusta el suministro de gas para mantener una temperatura constante. Este tipo de quemadores permite un mayor ahorro de energía y un control más preciso de la temperatura en comparación con los quemadores ON-OFF o alto-bajo. (Riello S. p. A, 2001)

4.8 Automatización y control de procesos

Es la aplicación de tecnologías y sistemas para operar y controlar procesos industriales sin la necesidad de intervención humana directa, permitiendo la optimización y mejora de la eficiencia, seguridad y calidad en la producción.

Por otro lado, el control industrial es una parte importante de la automatización industrial y se refiere al proceso de regular y supervisar las variables de un sistema industrial (como temperatura, presión, flujo, nivel, etc.) para asegurar que se mantengan dentro de rangos de operación seguros y óptimos. El control industrial puede ser realizado de forma manual o automática, utilizando sistemas de control como controladores lógicos programables (PLC), sistemas de control distribuido (DCS) o sistemas de control supervisados por computadora (SCADA).

4.8.1 Sistemas de control.

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada por el operario. Un caso típico fue el control de acabado de un producto en un horno. El operario era realmente el "instrumento de control" que juzgaba la marcha del proceso por el color de la llama, por el tiempo de humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto y decidía así el momento de retirar la pieza; en esta decisión influía muchas veces la suerte, de tal modo que no siempre la pieza se retiraba en las mejores condiciones de fabricación. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que, a su vez, permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos. (Creus, 2010).

Los procesos normalmente están sujetos a la influencia de agentes externos que ocasionan cambios en su comportamiento, este hecho obliga a la necesidad de controlar a las variables de mayor importancia dentro de cada proceso; en un tratamiento térmico la temperatura es la variable de mayor interés

Los sistemas de control tienen el propósito de modificar la magnitud de las variables de mayor importancia en base a los requerimientos del sistema logrando así que el proceso funcione de acuerdo a las especificaciones dadas, Evitando cambios bruscos o comportamientos inesperados, Convirtiéndose así en un sistema estable y robusto que no se inmuta con las perturbaciones.

4.8.2 Controladores industriales

En los sistemas de control, el controlador es el elemento encargado de comparar la señal de referencia con la señal de salida del proceso y producir una señal de control, la cual, es enviada al actuador para tratar de corregir el error y mantener la variable controlada en el valor de referencia

preestablecido (set point).Desde el punto de vista de la tecnología de fabricación, estos se pueden clasificar en: neumáticos, electrónicos y digitales (basados en microprocesador) ver Figura 6 y

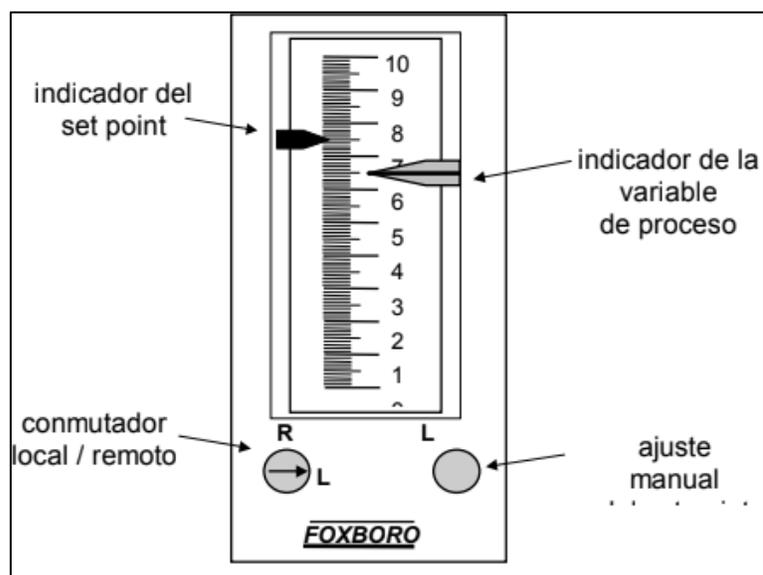


Figura 6. Controlador de procesos.

Fuente: extraído de <https://www.geocities.ws/joeldupar/control2/pid>



Figura 7. Controlador de temperatura basado en microprocesador

Fuente: Extraído de <https://suconel.com/product/controlador-de-temperatura-pid-maxthermo-mc5438c/>

- **Modos de operación del controlador:**

Automático: En este modo de operación el controlador decide y emite la señal apropiada hacia el elemento final de control, para mantener la variable controlada en el punto de referencia.

Manual: Cuando el controlador está en manual, éste cesa de decidir y “congela” su salida, entonces el operario o ingeniero puede cambiar manualmente el set point o punto de referencia. En el modo manual, el punto de referencia no tiene influencia sobre la salida del controlador, solamente el ajuste manual tiene efecto sobre la salida del controlador.

Local: Este modo de operación se elige cuando el set point lo manipula el operador, desde el panel donde está ubicado el instrumento, mediante una perilla o interruptor.

Remoto: Cuando el punto de referencia lo fija otro dispositivo, controlador, relevador o computador, se elige el modo de operación remota. Cuando se selecciona el modo remoto, la perilla de ajuste de modo local no tiene efecto; en este caso el controlador recibe la señal de referencia desde otro dispositivo.

Acción inversa: En este modo, el controlador presenta un decremento en la señal de salida, cuando hay un incremento en la señal de entrada. Un ejemplo de aplicación se presenta en el control de la temperatura de un intercambiador de vapor.

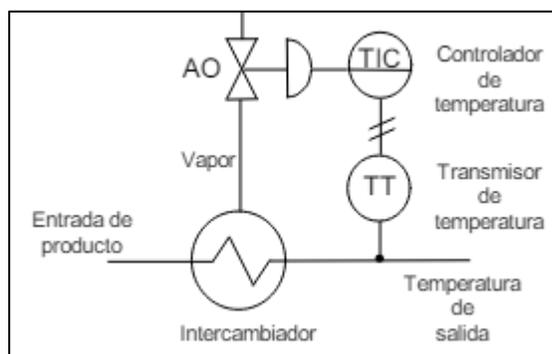


Figura 8. Control de un intercambiador de calor

Fuente: Extraído de <https://www.geocities.ws/joeldupar/control2/pid>

En este caso, si la temperatura aumenta y sobrepasa el punto de referencia, el controlador debe cerrar la válvula de vapor. Debido a que la válvula es de aire para abrir (AO), se debe reducir la señal de salida del controlador (presión de aire o corriente).

4.9 Instrumentación y sensores

La instrumentación y los sensores son componentes clave en la automatización industrial y el control industrial. Los sensores se utilizan para medir variables como la temperatura, la presión y el flujo, mientras que la instrumentación se utiliza para recopilar y procesar datos de los sensores y otros dispositivos.

4.9.1 Medida de temperatura.

La temperatura es una magnitud escalar que se asocia a la sensación de calor o frío producto de la energía interna de un sistema termodinámico. La variación de temperatura hace que las sustancias cambien de estado y propiedades, en tal sentido es necesario ejercer un preciso control sobre esta variación a fin de conseguir las propiedades deseadas de los materiales sometidos a

tratamientos térmicos, la base del control de temperatura se obtiene al conocer con exactitud su valor; siendo necesario tener un claro conocimiento de las escalas de medición de temperatura y los principales métodos para conocer el valor de esta variable.

La temperatura es una variable crítica en muchos procesos industriales, incluyendo la remoción del PTFE por degradación térmica. La medida de temperatura es una de las más comunes y de las más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Casi todos los fenómenos físicos están afectados por ella. La temperatura se utiliza frecuentemente para inferir el valor de otras variables del proceso.

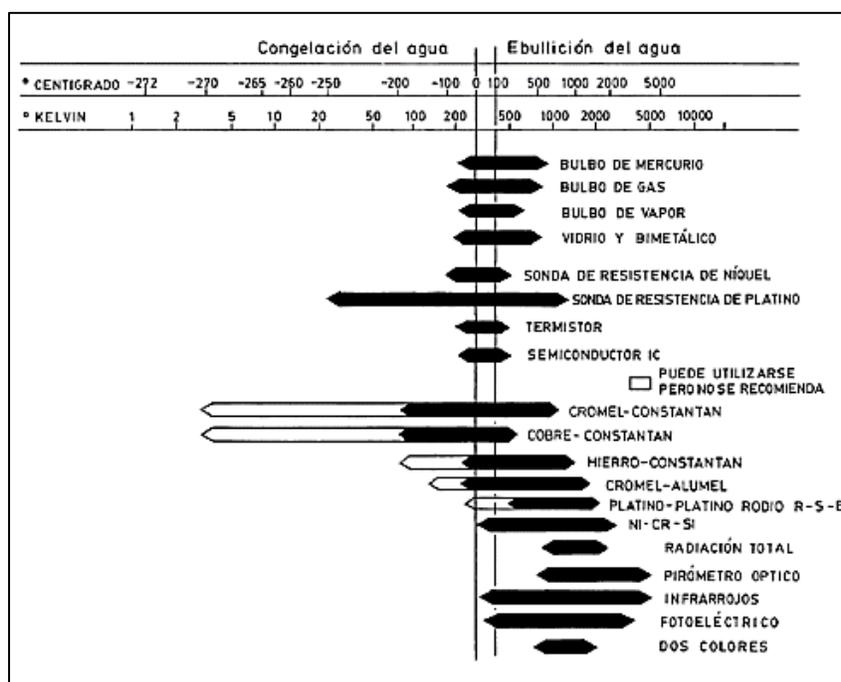


Figura 9. Campo de medida de los instrumentos de medida de temperatura.

Fuente: Extraído de (Creus, 2010)

Existen diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y que son utilizados para medirla:

- Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- La f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).

De este modo, se emplean los siguientes instrumentos: termómetros de vidrio, termómetros bimetalicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termómetros de resistencia, termopares, pirómetros de radiación, termómetros ultrasónicos y termómetros de cristal de cuarzo.

4.9.2 Escalas de medición de temperatura

Dentro del proceso de medición de variables, la estandarización de los valores obtenidos constituye un paso fundamental; en el caso de la temperatura existen varias escalas utilizadas, estas pueden ser absolutas que no dependen de las propiedades de la sustancia correlativas que sí dependen de ellas.

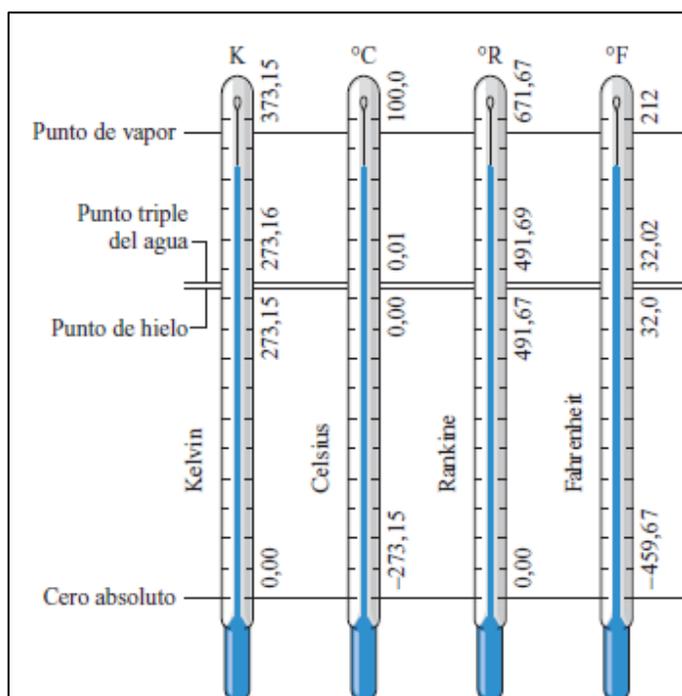


Figura 10. Comparación de las escalas de temperatura.

Fuente: Extraído de (Moran & Shapiro, 2004)

Las escalas de temperatura de mayor utilización son:

- Escala Celsius o Centígrada (°C): Es relativa ya que toma como referencia la numeración decimal del Sistema Internacional (SI) y los puntos los puntos de fusión o congelación (0 °C) y ebullición del agua (100 °C).

- La escala Fahrenheit (°F): normalmente usada en países anglosajones, es una escala relativa basada en el punto de congelación de una disolución de cloruro amónico (°F) y la temperatura corporal humana (°F 100).
- La escala Kelvin (K): Es una magnitud absoluta del SI que se fundamenta y toma como origen el cero absoluto, que es el punto donde no existe movimiento molecular y la materia deja de emitir energía; en esta escala la temperatura de congelamiento del agua es a 273,16 °K.

La escala Celsius es la más utilizada en nuestro medio, sin embargo, puede encontrarse con facilidad medidas representadas en otras unidades, siendo importante conocer las ecuaciones que permiten transformar de una escala a otra, Ecuación 3

$$\frac{C}{5} = \frac{^{\circ}F - 32}{9} = \frac{^{\circ}K - 273,15}{5}$$

Ecuación 3. Ecuación para transformar de una escala a otra.

Donde: ° C Grados Celsius
 ° F Grados Fahrenheit
 ° K Grados Kelvin

4.9.3 Métodos de medición de temperatura

Se indicó anteriormente la importancia de obtener una medida exacta de la temperatura para poder controlar adecuadamente la variación de esta magnitud, en la práctica existen numerosos tipos de sensores de temperatura cuya utilización dependerá del rango a medir, de las características del proceso e indudablemente el factor económico; dentro de las principales alternativas o métodos de medición de temperatura se tienen las siguientes alternativas:

- **Termómetros de vidrio**

El termómetro de vidrio consta de un depósito de vidrio que contiene, por ejemplo, mercurio y que al calentarse se expande y sube en el tubo capilar.



Figura 11. Termómetro de vidrio.

Fuente: Extraído de (Creus, 2010)

Tabla 6.

Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados

Mercurio	-35 hasta +280 °C
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	-35 hasta +450 °C.
Pentano	-200 hasta +20 °C.
Alcohol	-110 hasta +50 °C
Tolueno	-70 hasta +100 °C

Fuente: Extraído de (Creus, 2010)

Los fluidos de mayor utilización en el termómetro de vidrio son: mercurio, tolueno como alcohol y acetona y su principal aplicación se da en los laboratorios debido a que su rango de medición es de menos 35 a 280 °C, y siendo el termómetro de mercurio el de mayor rango de medición.

- **Termómetro bimetalico**

se fundamentan en los distintos coeficientes de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de ferroníquel o Invar (35,5% de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetalicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices. Ver Figura 12 Termómetro bimetalico.

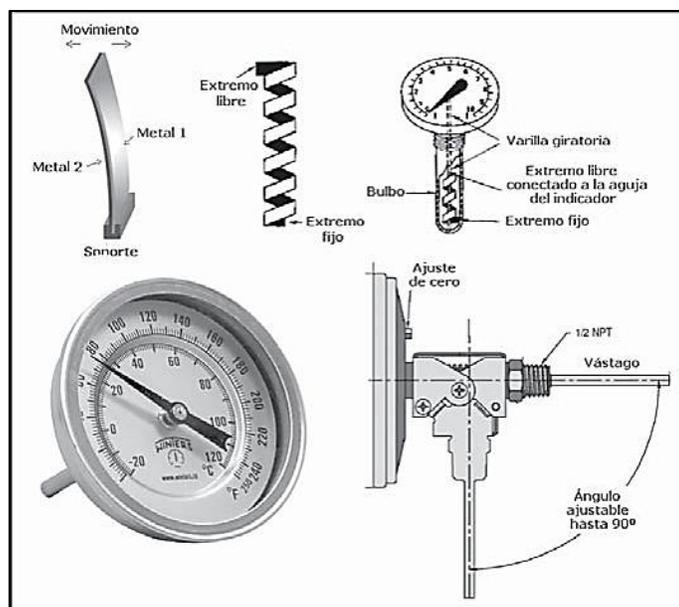


Figura 12 Termómetro bimetalico.

Fuente: Extraído de (Creus, 2010)

Un termómetro bimetalico típico contiene pocas partes móviles, sólo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o hélice y el propio elemento bimetalico. El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes, y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos. No hay engranajes que exijan un mantenimiento.

El uso de termómetros bimetalicos es admisible para servicio continuo de 0 °C a 400 °C. (Creus, 2010).

- **Termómetros de resistencia (RTD)**

El dispositivo termo resistivo (RTD) es un elemento caracterizado por su lineal y rápida respuesta que cambia el valor de la resistencia eléctrica en función de la temperatura al que es sometido

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección

El elemento consiste en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado coeficiente de temperatura de resistencia” que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la siguiente expresión lineal, Ecuación 4

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

Ecuación 4.

Donde:

R_0 = Resistencia en ohmios a 0 °C

R_t = Resistencia en ohmios a t °C

α = Coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0 °C y 100 °C es de 0,003850 $\Omega / \Omega / ^\circ\text{C}$) en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

Esta relación presenta una diferencia en la resistencia en ohmios entre R_t y la resistencia real de la sonda, según puede verse en la Figura 13 Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la fórmula $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$. Figura 13.

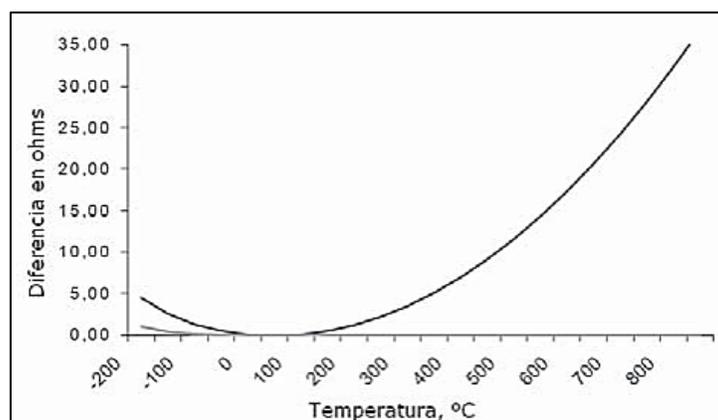


Figura 13 Relación entre el valor real de la resistencia y el obtenido por la fórmula $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$.

Fuente: (Creus, 2010)

Nota: Curva de color gris claro = temperatura < 0 °C.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<i>Resistencia en ohmios</i>									
-220	10,408									
-210	14,360	13,951	13,546	13,145	12,746	12,350	11,955	11,565	11,177	10,793
-200	18,530	18,109	17,689	17,268	16,849	16,429	16,012	15,595	15,182	14,769
-190	22,782	22,354	21,928	21,501	21,073	20,646	20,221	19,796	19,373	18,950
-180	27,049	26,623	26,197	25,771	25,345	24,918	24,492	24,064	23,637	23,209
-170	31,280	30,859	30,437	30,015	29,592	29,169	28,746	28,322	27,899	27,473
-160	35,478	35,060	34,641	34,222	33,803	33,383	32,963	32,543	32,122	31,701
-150	39,651	39,234	38,818	38,401	37,984	37,567	37,150	36,732	36,315	35,897
-140	43,802	43,387	42,973	42,559	42,144	41,729	41,314	40,898	40,483	40,067
-130	47,932	47,520	47,107	46,695	46,282	45,869	45,456	45,043	44,629	44,215
-120	52,041	51,631	51,221	50,811	50,400	49,989	49,578	49,167	48,755	48,344
-110	56,131	55,722	55,314	54,906	54,497	54,088	53,679	53,270	52,861	52,451
-100	60,201	59,794	59,388	58,982	58,575	58,168	57,761	57,354	56,946	56,538
-90	64,252	63,847	63,443	63,038	62,634	62,229	61,823	61,418	61,012	60,607
-80	68,282	67,880	67,478	67,075	66,673	66,270	65,866	65,463	65,059	64,656
-70	72,291	71,892	71,419	71,091	70,690	70,290	69,889	69,487	69,086	68,684
-60	76,279	75,882	75,483	75,085	74,687	74,288	73,889	73,490	73,091	72,691
-50	80,250	79,854	79,457	79,061	78,664	78,267	77,870	77,472	77,075	76,677
-40	84,212	83,816	83,420	83,024	82,628	82,232	81,836	81,439	81,043	80,647
-30	88,170	87,774	87,378	86,983	86,587	86,191	85,795	85,399	85,003	84,607
-20	92,127	91,731	91,336	90,940	90,545	90,149	89,753	89,357	88,962	88,566
-10	96,072	95,679	95,285	94,891	94,496	94,102	93,707	93,312	92,917	92,522
0	100,000	99,608	99,216	98,823	98,431	98,038	97,645	97,253	96,859	96,466
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,952	102,343	102,733	103,123	103,512
10	103,902	104,292	104,681	105,070	105,460	105,894	106,238	106,627	107,015	107,404
20	107,793	108,181	108,569	108,957	109,345	109,733	110,121	110,509	110,897	111,284
30	111,671	112,059	112,446	112,833	113,220	113,607	113,993	114,380	114,766	115,153
40	115,539	115,925	116,311	116,697	117,083	117,468	117,854	118,239	118,624	119,010
50	119,395	119,780	120,164	120,549	120,934	121,318	121,702	122,087	122,471	122,855
60	123,239	123,623	124,006	124,390	124,773	125,157	125,540	125,923	126,306	126,689
70	127,071	127,454	127,837	128,219	128,601	128,983	129,365	129,747	130,129	130,511
80	130,893	131,275	131,656	132,037	132,418	132,800	133,180	133,560	133,941	134,321
90	134,702	135,082	135,463	135,843	136,223	136,602	136,982	137,362	137,741	138,121
100	138,500	138,879	139,258	139,637	140,016	140,395	140,773	141,152	141,530	141,908
110	142,286	142,664	143,042	143,420	143,798	144,175	144,553	144,930	145,307	145,684
120	146,061	146,438	146,815	147,191	147,568	147,944	148,320	148,697	149,073	149,449
130	149,824	150,200	150,576	150,951	151,326	151,702	152,077	152,452	152,827	153,201
140	153,576	153,951	154,323	154,699	155,075	155,448	155,822	156,195	156,569	156,943
150	157,316	157,690	158,063	158,436	158,809	159,182	159,555	159,927	160,300	160,672
160	161,045	161,417	161,785	162,161	162,533	162,905	163,276	163,648	164,019	164,391
170	164,762	165,133	165,504	165,875	166,245	166,616	166,986	167,357	167,727	168,097
180	168,467	168,837	169,209	169,576	169,946	170,315	170,685	171,054	171,423	171,792
190	172,161	172,530	172,898	173,267	173,625	174,003	174,372	174,740	175,108	175,475
200	175,843	176,211	176,578	176,946	177,313	177,689	178,047	178,414	178,781	179,147
210	179,514	179,880	180,247	180,613	180,979	181,345	181,711	182,076	182,442	182,808
220	183,173	183,538	183,903	184,268	184,633	184,998	185,363	185,727	186,092	186,456
230	186,821	187,185	187,549	187,913	188,276	188,640	189,004	189,367	189,730	190,093
240	190,457	190,819	191,182	191,545	191,908	192,270	192,633	192,995	193,357	193,719
250	194,081	194,443	194,804	195,166	195,527	195,889	196,250	196,611	196,972	197,333
260	197,694	198,054	198,415	198,775	199,136	199,496	199,856	200,216	200,576	200,935
270	201,295	201,655	202,014	202,373	202,732	203,091	203,450	203,809	204,168	204,526
280	204,885	205,243	205,601	205,959	206,317	206,675	207,033	207,391	207,748	208,106
290	208,463	208,820	209,177	209,534	209,891	210,248	210,604	210,961	211,317	211,673
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figura 14. Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385.

Fuente: Extraído de (Creus, 2010).

Nota: En la Figura 14 pueden verse los valores de resistencia de las sondas de Pt100. A señalar que la misma tabla es válida para termorresistencias Pt500 (500 ohmios a 0 °C) y Pt1000 (1.000 ohmios a 0 °C) multiplicando los valores correspondientes por 5 y por 10, respectivamente.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Resistencia en ohmios									
300	212,030	212,386	212,741	213,097	213,453	213,808	214,164	214,519	214,874	215,230
310	215,585	215,939	216,294	216,649	217,003	217,358	217,712	218,066	218,429	218,774
320	219,128	219,482	219,835	220,189	220,542	220,895	220,248	221,602	221,954	222,307
330	222,660	223,012	223,365	223,717	224,069	224,421	224,773	225,125	225,477	225,829
340	226,180	226,532	226,883	227,234	227,585	227,936	228,287	228,638	228,988	229,339
350	229,689	230,039	230,389	230,739	231,089	231,439	231,789	232,138	232,488	232,837
360	233,689	233,535	233,884	234,233	234,582	234,930	235,279	235,627	235,975	236,324
370	236,672	237,020	237,367	237,715	238,063	238,410	238,757	239,105	239,452	239,799
380	240,146	240,492	240,839	241,186	241,532	241,878	241,225	242,571	242,917	243,262
390	243,608	243,954	244,299	244,645	244,990	245,335	245,680	246,025	246,370	246,715
400	247,059	247,404	247,748	248,092	248,436	248,780	249,124	249,468	249,811	250,155
410	250,498	250,842	251,185	251,528	251,871	252,214	252,556	252,899	253,242	253,584
420	253,926	254,268	254,610	254,952	255,294	255,636	255,977	256,319	256,660	257,001
430	257,342	257,683	258,024	258,365	258,706	259,046	259,387	259,727	260,067	260,407
440	260,747	261,087	261,427	261,766	262,106	262,445	262,784	263,123	263,462	263,801
450	264,140	264,479	264,817	265,156	265,494	265,832	266,170	266,508	266,846	267,184
460	267,522	267,859	268,196	268,534	268,871	269,208	269,545	269,882	270,218	270,555
470	270,891	271,228	271,564	271,900	272,236	272,572	272,908	273,244	273,579	273,914
480	274,250	274,585	274,920	275,255	275,590	275,925	276,259	276,594	276,928	277,262
490	277,597	277,931	278,265	278,598	278,932	279,266	279,599	279,932	280,266	280,599
500	280,932	281,265	281,597	281,930	282,263	282,595	282,927	283,260	283,592	283,924
510	284,255	284,587	284,919	285,250	285,582	285,913	286,244	286,575	286,906	287,237
520	287,568	287,898	288,229	288,559	288,889	289,219	289,549	289,879	290,209	290,539
530	290,868	291,198	291,527	291,856	292,185	292,514	292,843	293,172	293,500	293,829
540	294,157	294,485	294,813	295,141	295,469	295,797	296,125	296,452	296,780	297,107
550	297,434	297,761	297,089	298,415	298,742	299,069	299,395	299,722	300,048	300,374
560	300,700	301,026	301,352	301,678	302,003	302,329	302,654	302,979	303,304	303,630
570	303,954	304,279	304,604	304,928	305,253	305,577	305,901	306,226	306,549	306,873
580	307,197	307,512	307,844	308,168	308,491	308,814	309,137	309,460	309,783	310,106
590	310,428	310,751	311,073	311,395	311,717	312,039	312,361	312,683	313,005	313,326
600	313,648	313,969	314,290	314,611	314,932	315,253	315,574	315,895	316,215	316,535
610	316,856	317,176	317,496	317,816	318,136	318,455	318,775	319,094	319,414	319,733
620	320,052	320,371	320,690	321,009	321,327	321,646	321,964	322,283	322,601	322,919
630	323,237	323,555	323,873	324,190	324,508	324,825	325,142	325,459	325,776	326,093
640	326,410	326,727	327,043	327,360	327,676	327,992	328,309	328,625	328,940	329,256
650	329,572	329,887	330,203	330,518	330,833	331,148	331,463	331,778	332,093	332,408
660	332,722	333,036	333,351	333,665	333,979	334,293	334,607	334,920	335,234	335,547
670	335,861	336,174	336,487	336,800	337,113	337,426	337,738	338,051	338,363	338,675
680	338,988	339,300	339,612	339,923	340,235	340,547	340,858	341,170	341,481	341,792
690	342,103	342,414	342,725	343,035	343,346	343,656	343,967	344,277	344,587	344,897
700	345,207	345,517	345,826	346,136	346,445	346,754	347,064	347,373	347,682	347,990
710	348,299	348,608	348,916	349,225	349,533	349,841	350,149	350,457	350,765	351,072
720	351,380	351,687	351,995	352,302	352,609	352,916	353,223	353,529	353,836	354,143
730	354,449	354,755	355,061	355,367	355,673	355,979	356,285	356,591	356,896	357,201
740	357,507	357,812	358,117	358,422	358,726	359,031	359,336	359,640	359,944	360,249
750	360,553	360,857	361,160	361,464	361,768	362,071	362,375	362,678	362,981	363,284
760	363,587	363,890	364,193	364,495	364,798	365,100	365,402	365,704	366,006	366,308
770	366,610	366,912	367,213	367,515	367,816	368,117	368,418	368,719	369,020	369,321
780	369,621	369,922	370,222	370,522	370,823	371,123	371,422	371,722	372,022	372,322
790	372,621	372,920	373,220	373,519	373,818	374,116	374,415	374,714	375,013	375,311
800	375,609	375,907	376,205	376,503	376,801	377,099	377,296	377,694	377,991	378,289
810	378,586	378,883	379,180	379,477	379,773	380,070	380,366	380,662	380,959	381,255
820	381,551	381,847	382,143	382,438	382,734	383,029	383,324	383,620	383,914	384,209
830	384,504	384,799	385,094	385,388	385,682	385,977	386,271	386,565	386,859	387,153
840	387,446	387,740	388,033	388,327	388,620	388,913	389,206	389,499	389,791	390,084
850	390,377									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figura 15. Continuación valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385.

Fuente: Extraído de (Creus, 2010).

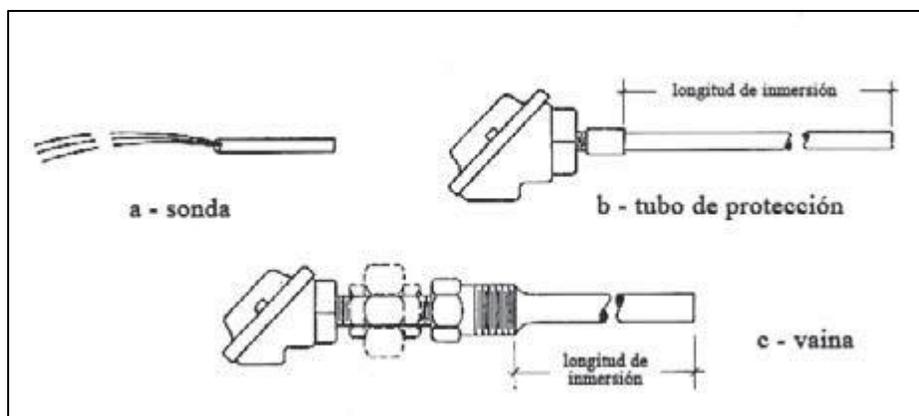


Figura 16. Tipos de sondas y conexiones.

Fuente: extraído de (Creus, 2010).

Nota: Varios tipos de sondas con algunas conexiones al proceso (racord fijo es la forma más usual).

• Termopares

El termopar se basa en el efecto, descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura.

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier, que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson (año 1854), que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

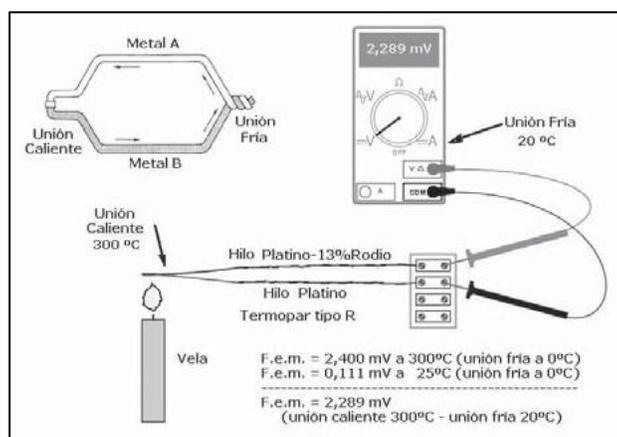


Figura 17. Termopar.

Fuente: Extraído de (Antonio Creus, 2010)

- **Termopares más comunes son:**
 - Termopar tipo E: De Níquel-Cromo (Cromel)/Cobre-Níquel (Constantán). Puede usarse en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este termopar posee la f.e.m. más alta por variación de temperatura. Es adecuado para temperaturas entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alta sensibilidad ($68\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$).
 - Termopar tipo T: De Cobre/Cobre-Níquel (Constantán). Se prefiere, generalmente, para las medidas de temperatura entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - Termopar tipo J: De Hierro/Cobre-Níquel (Constantán). Es adecuado en atmósferas inertes y para temperaturas entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - Termopar tipo K: de Níquel-Cromo (Cromel) /Níquel-Aluminio (alumel). Se recomienda en atmosferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1.250°C . No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas, a menos que esté protegido con un tubo de protección. Se utiliza para temperaturas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Figura 18 muestra las tolerancias de las clases de termopares y el intervalo de temperaturas de trabajo.

TERMOPAR	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	Temperaturas de trabajo
Tipo E Ni Cr/Cu Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ -40°C a 800°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ -40°C a 900°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ -200°C a 40°C	-200 a $915\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo T Cu/Cu Ni	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ -40°C a 350°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ -40°C a 350°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ -200°C a 40°C	-200 a $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo J Fe/Cu Ni	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ -40°C a 750°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ -40°C a 750°C	-----	-200 a $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo K Ni Cr/Ni Al	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ -40°C a 1000°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ -40°C a 1200°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ -200°C a 40°C	-200 a $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo R Pt13%Rh/Pt	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $(1+0.003(t-1100))$ 0°C a 1600°C	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0025 \times t)$ 0°C a 1600°C	-----	-50 a $+1768\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo S Pt10%Rh/Pt	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ó $(1+0.003(t-1100))$ 0°C a 1600°C	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0025 \times t)$ 0°C a 1600°C	-----	-50 a $+1768\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo B Pt30%Rh/Pt6%Rh	-----	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0025 \times t)$ 600°C a 1700°C	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.005 \times t)$ 600°C a 1700°C	0 a $1820\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tipo N Ni Cr Si/Ni Si Mg	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.004 \times t)$ 40°C a 1000°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0075 \times t)$ -40°C a 1200°C	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ó $\pm(0.0015 \times t)$ -200°C a 40°C	-270 a $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 18. Tolerancias y temperaturas de trabajo de termopares. Norma IEC 584-1.

Fuente: (Creus, 2010).

Está concebido principalmente para atmosferas neutras. De hecho, se debe tener especial cuidado a la hora de proteger el sensor cuando se utiliza en otro ambiente distinto. La temperatura máxima en continuo se aproxima a los 1100°C y en períodos cortos de tiempo alcanza los 1200°C. Por encima de los 800°C la oxidación causa deriva y des calibración de forma más pronunciada.



Figura 19. Termopar industrial con vaina metálica de protección.

Fuente: Extraído de («Termopar Industrial Con Vaina Metálica de Protección - TC S.A.», 2024)

- **Tablas de Referencia Internacional Para Termopares**

Según la IEC 60584-1

Esta normativa está basada en la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90). Las temperaturas se muestran en grados Celsius (T_{90}) y las salidas de f.e.m. en microvoltios (μV).

Tabla 7

Tabla 7.

Tablas de Referencia Internacional Para Termopares Tipo K – Níquel – Cromo / Níquel – Aluminio

°C (t_{90})	f.e.m./ μV										°C (t_{90})	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
-270	-6458											-270
-260	-6441	-6444	-6446	-6448	-6450	-6452	-6453	-6455	-6456	-6457		-260
-250	-6404	-6408	-6413	-6417	-6421	-6425	-6429	-6432	-6435	-6438		-250
-240	-6344	-6351	-6358	-6364	-6370	-6377	-6382	-6388	-6393	-6399		-240

-230	-6262	-6271	-6280	-6289	-6297	-6306	-6314	-6322	-6329	-6337	-230
-220	-6158	-6170	-6181	-6192	-6202	-6213	-6223	-6233	-6243	-6252	-220
-210	-6035	-6048	-6061	-6074	-6087	-6099	-6111	-6123	-6135	-6147	-210
-200	-5891	-5907	-5922	-5936	-5951	-5965	-5980	-5994	-6007	-6021	-200
-190	-5730	-5747	-5763	-5780	-5797	-5813	-5829	-5845	-5861	-5876	-190
-180	-5550	-5569	-5588	-5606	-5624	-5642	-5660	-5678	-5695	-5713	-180
-170	-5354	-5374	-5395	-5415	-5435	-5454	-5474	-5493	-5512	-5531	-170
-160	-5141	-5163	-5185	-5207	-5228	-5250	-5271	-5292	-5313	-5333	-160
-150	-4913	-4936	-4960	-4983	-5006	-5029	-5052	-5074	-5097	-5119	-150
-140	-4669	-4694	-4719	-4744	-4768	-4793	-4817	-4841	-4865	-4889	-140
-130	-4411	-4437	-4463	-4490	-4516	-4542	-4567	-4593	-4618	-4644	-130
-120	-4138	-4166	-4194	-4221	-4249	-4276	-4303	-4330	-4357	-4384	-120
-110	-3852	-3882	-3911	-3939	-3968	-3997	-4025	-4054	-4082	-4110	-110
-100	-3554	-3584	-3614	-3645	-3675	-3705	-3734	-3764	-3794	-3823	-100
-90	-3243	-3274	-3306	-3337	-3368	-3400	-3431	-3462	-3492	-3523	-90
-80	-2920	-2953	-2986	-3018	-3050	-3083	-3115	-3147	-3179	-3211	-80
-70	-2587	-2620	-2654	-2688	-2721	-2755	-2788	-2821	-2854	-2887	-70
-60	-2243	-2278	-2312	-2347	-2382	-2416	-2450	-2485	-2519	-2553	-60
-50	-1889	-1925	-1961	-1996	-2032	-2067	-2103	-2138	-2173	-2208	-50
-40	-1527	-1564	-1600	-1637	-1673	-1709	-1745	-1782	-1818	-1854	-40
-30	-1156	-1194	-1231	-1268	-1305	-1343	-1380	-1417	-1453	-1490	-30
-20	-778	-816	-854	-892	-930	-968	-1006	-1043	-1081	-1119	-20
-10	-392	-431	-470	-508	-547	-586	-624	-663	-701	-739	-10
0	0	-39	-79	-118	-157	-197	-236	-275	-314	-353	0
0	0	39	79	119	158	198	238	277	317	357	0
10	397	437	477	517	557	597	637	677	718	758	10
20	798	838	879	919	960	1000	1041	1081	1122	1163	20
30	1203	1244	1285	1326	1366	1407	1448	1489	1530	1571	30
40	1612	1653	1694	1735	1776	1817	1858	1899	1941	1982	40
50	2023	2064	2106	2147	2188	2230	2271	2312	2354	2395	50
60	2436	2478	2519	2561	2602	2644	2685	2727	2768	2810	60
70	2851	2893	2934	2976	3017	3059	3100	3142	3184	3225	70
80	3267	3308	3350	3391	3433	3474	3516	3557	3599	3640	80
90	3682	3723	3765	3806	3848	3889	3931	3972	4013	4055	90
100	4096	4138	4179	4220	4262	4303	4344	4385	4427	4468	100
110	4509	4550	4591	4633	4674	4715	4756	4797	4838	4879	110
120	4920	4961	5002	5043	5084	5124	5165	5206	5247	5288	120
130	5328	5369	5410	5450	5491	5532	5572	5613	5653	5694	130
140	5735	5775	5815	5856	5896	5937	5977	6017	6058	6098	140
150	6138	6179	6219	6259	6299	6339	6380	6420	6460	6500	150

160	6540	6580	6620	6660	6701	6741	6781	6821	6861	6901	160
170	6941	6981	7021	7060	7100	7140	7180	7220	7260	7300	170
180	7340	7380	7420	7460	7500	7540	7579	7619	7659	7699	180
190	7739	7779	7819	7859	7899	7939	7979	8019	8059	8099	190
200	8138	8178	8218	8258	8298	8338	8378	8418	8458	8499	200
210	8539	8579	8619	8659	8699	8739	8779	8819	8860	8900	210
220	8940	8980	9020	9061	9101	9141	9181	9222	9262	9302	220
230	9343	9383	9423	9464	9504	9545	9585	9626	9666	9707	230
240	9747	9788	9828	9869	9909	9950	9991	10031	10072	10113	240
250	10153	10194	10235	10276	10316	10357	10398	10439	10480	10520	250
260	10561	10602	10643	10684	10725	10766	10807	10848	10889	10930	260
270	10971	11012	11053	11094	11135	11176	11217	11259	11300	11341	270
280	11382	11423	11465	11506	11547	11588	11630	11671	11712	11753	280

°C (t ₉₀)	f.e.m./μV										°C (t ₉₀)
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
300	12209	12250	12291	12333	12374	12416	12457	12499	12540	12582	300
310	12624	12665	12707	12748	12790	12831	12873	12915	12956	12998	310
320	13040	13081	13123	13165	13206	13248	13290	13331	13373	13415	320
330	13457	13498	13540	13582	13624	13665	13707	13749	13791	13833	330
340	13874	13916	13958	14000	14042	14084	14126	14167	14209	14251	340
350	14293	14335	14377	14419	14461	14503	14545	14587	14629	14671	350
360	14713	14755	14797	14839	14881	14923	14965	15007	15049	15091	360
370	15133	15175	15217	15259	15301	15343	15385	15427	15469	15511	370
380	15554	15596	15638	15680	15722	15764	15806	15849	15891	15933	380
390	15975	16017	16059	16102	16144	16186	16228	16270	16313	16355	390
400	16397	16439	16482	16524	16566	16608	16651	16693	16735	16778	400
410	16820	16862	16904	16947	16989	17031	17074	17116	17158	17201	410
420	17243	17285	17328	17370	17413	17455	17497	17540	17582	17624	420
430	17667	17709	17752	17794	17837	17879	17921	17964	18006	18049	430
440	18091	18134	18176	18218	18261	18303	18346	18388	18431	18473	440
450	18516	18558	18601	18643	18686	18728	18771	18813	18856	18898	450
460	18941	18983	19026	19068	19111	19154	19196	19239	19281	19324	460
470	19366	19409	19451	19494	19537	19579	19622	19664	19707	19750	470
480	19792	19835	19877	19920	19962	20005	20048	20090	20133	20175	480
490	20218	20261	20303	20346	20389	20431	20474	20516	20559	20602	490
500	20644	20687	20730	20772	20815	20857	20900	20943	20985	21028	500
510	21071	21113	21156	21199	21241	21284	21326	21369	21412	21454	510
520	21497	21540	21582	21625	21668	21710	21753	21796	21838	21881	520

530	21924	21966	22009	22052	22094	22137	22179	22222	22265	22307	530
540	22350	22393	22435	22478	22521	22563	22606	22649	22691	22734	540
550	22776	22819	22862	22904	22947	22990	23032	23075	23117	23160	550
560	23203	23245	23288	23331	23373	23416	23458	23501	23544	23586	560
570	23629	23671	23714	23757	23799	23842	23884	23927	23970	24012	570
580	24055	24097	24140	24182	24225	24267	24310	24353	24395	24438	580
590	24480	24523	24565	24608	24650	24693	24735	24778	24820	24863	590
600	24905	24948	24990	25033	25075	25118	25160	25203	25245	25288	600
610	25330	25373	25415	25458	25500	25543	25585	25627	25670	25712	610
620	25755	25797	25840	25882	25924	25967	26009	26052	26094	26136	620
630	26179	26221	26263	26306	26348	26390	26433	26475	26517	26560	630
640	26602	26644	26687	26729	26771	26814	26856	26898	26940	26983	640
650	27025	27067	27109	27152	27194	27236	27278	27320	27363	27405	650
660	27447	27489	27531	27574	27616	27658	27700	27742	27784	27826	660
670	27869	27911	27953	27995	28037	28079	28121	28163	28205	28247	670
680	28289	28332	28374	28416	28458	28500	28542	28584	28626	28668	680
690	28710	28752	28794	28835	28877	28919	28961	29003	29045	29087	690
700	29129	29171	29213	29255	29297	29338	29380	29422	29464	29506	700
710	29548	29589	29631	29673	29715	29757	29798	29840	29882	29924	710
720	29965	30007	30049	30090	30132	30174	30216	30257	30299	30341	720
730	30382	30424	30466	30507	30549	30590	30632	30674	30715	30757	730
740	30798	30840	30881	30923	30964	31006	31047	31089	31130	31172	740
750	31213	31255	31296	31338	31379	31421	31462	31504	31545	31586	750
760	31628	31669	31710	31752	31793	31834	31876	31917	31958	32000	760
770	32041	32082	32124	32165	32206	32247	32289	32330	32371	32412	770
780	32453	32495	32536	32577	32618	32659	32700	32742	32783	32824	780
790	32865	32906	32947	32988	33029	33070	33111	33152	33193	33234	790
800	33275	33316	33357	33398	33439	33480	33521	33562	33603	33644	800
810	33685	33726	33767	33808	33848	33889	33930	33971	34012	34053	810
820	34093	34134	34175	34216	34257	34297	34338	34379	34420	34460	820
830	34501	34542	34582	34623	34664	34704	34745	34786	34826	34867	830
840	34908	34948	34989	35029	35070	35110	35151	35192	35232	35273	840
850	35313	35354	35394	35435	35475	35516	35556	35596	35637	35677	850
860	35718	35758	35798	35839	35879	35920	35960	36000	36041	36081	860
870	36121	36162	36202	36242	36282	36323	36363	36403	36443	36484	870
880	36524	36564	36604	36644	36685	36725	36765	36805	36845	36885	880
890	36925	36965	37006	37046	37086	37126	37166	37206	37246	37286	890

Fuente: Extraído de («Termopar Industrial Con Vaina Metálica de Protección - TC S.A.», 2024, p. <https://www.tc-sa.es/termopares-informacion/tablas-referencia-internacional-termopares-tipo-k.html>).

5 Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Se utilizó el paradigma *Research for Design*, es decir, investigación para el diseño. Enmarcado en un proyecto de desarrollo experimental, ya que tiene como objetivo la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos para crear un nuevo producto tecnológico, en este caso es “Diseño y automatización de un control de temperatura para la cámara combustión de horno con capacidad de 13,5m³ útil, donde se garantice la circulación de aire homogéneo en el interior, para quemado de material antiadherente. El proyecto implica la investigación y experimentación en el diseño y construcción del horno, la implementación de tecnologías para la automatización del control de temperatura y la optimización de la circulación del aire, así como la validación de la efectividad del producto final.

5.2 Método.

Las etapas empleadas, su descripción, actividades desarrolladas y relación con los objetivos específicos, se fundamentan en algunos elementos del proceso de Diseño de Productos de Nigel Cross.

En la Figura 20. Cuadro metodológico., se puede apreciar la metodología a seguir para la realización del presente proyecto.

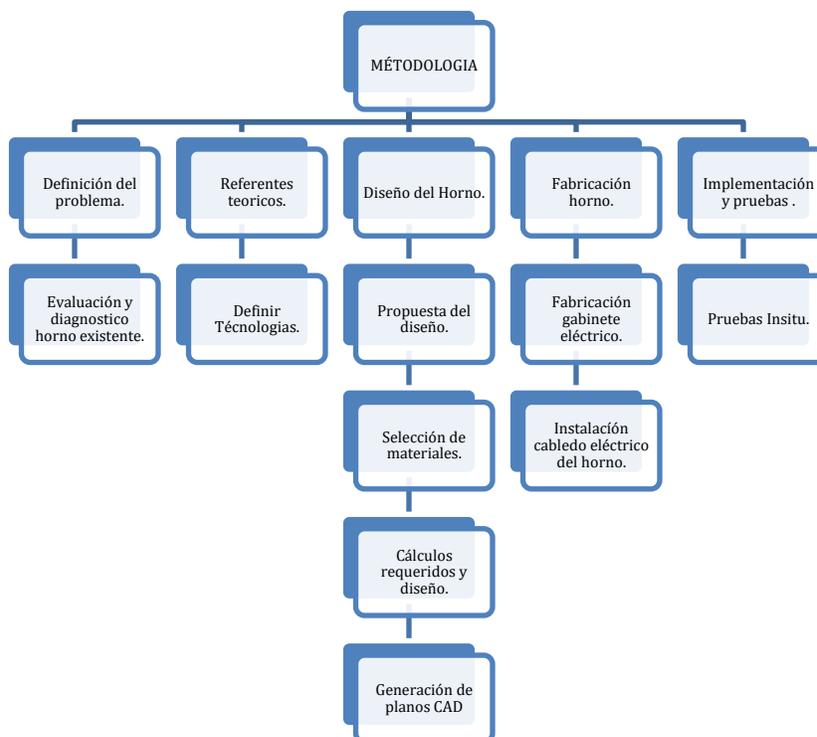


Figura 20. Cuadro metodológico.

Fuente: Propia del autor.

- Realizar un análisis de las necesidades y requerimientos específicos del proceso de quemado de material antiadherente en la cámara de combustión del horno.
- Diseñar el sistema de control de temperatura para la cámara de combustión del horno con capacidad de 13,5m³ útil, que permita mantener una temperatura homogénea y constante en su interior.
- Seleccionar y dimensionar los componentes y dispositivos necesarios para la implementación del sistema de control de temperatura, considerando las características específicas del proceso y la normativa aplicable.
- Desarrollar un sistema de automatización para el control de la temperatura en la cámara de combustión, que permita una operación eficiente y segura del horno.
- Verificar y validar el funcionamiento del sistema de control de temperatura en la cámara de combustión, asegurando que se cumplan los requisitos de calidad y eficiencia establecidos para el proceso de quemado de material antiadherente.

6 Resultados del proyecto

El diseño del horno de convección forzada consistió en la instalación de una cámara de combustión dimensionada de acuerdo con los requerimientos de energía del horno anterior y a las condiciones típicas de operación.

El sistema de recirculación de aire, se rediseñó en su totalidad, instalando dos ventiladores centrífugos para la recirculación del aire caliente, con un flujo transversal ascendente, los baffles deflectores para el ajuste de aire, mejorando de esta manera la homogeneización de la temperatura al interior del horno.

A la estructura del horno se le añadieron dos plenums para el direccionamiento del aire en la zona de presión positiva de los dos ventiladores centrífugos, debidamente aislados.

La estructura se configuró para admitir las dilataciones propias del trabajo a las temperaturas en la zona de succión (zona negativa).

Se instaló un plenum de retorno de aire completando la recirculación de gases hacia la cámara de combustión.

En la parte interna del horno se implementó un falso techo, que evita el paso directo de los gases calientes entre la cámara y la zona de trabajo.

Se instaló una chimenea de evacuación de gases debidamente calculada, con damper de regulación.

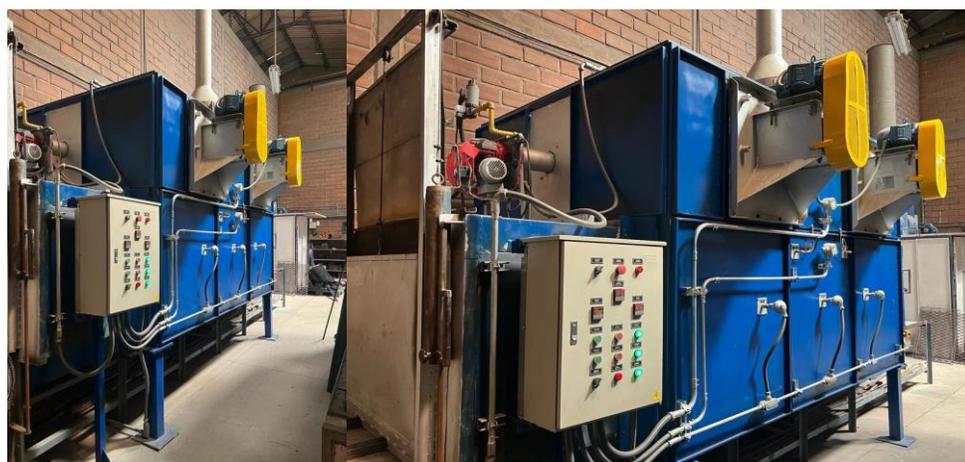


Figura 21 Estado final del horno.

Fuente: Propia del autor.

6.1 Cámara de combustión del horno.

Se fabrica en lámina de acero inoxidable de 3mm de espesor, con agujeros de tamaño diferencial para obtener una mejor relación de combustión y permitir una mejor mezcla de los gases con el aire de recirculación.

Tabla 8.

Especificaciones cámara de combustión.

Diámetro cámara de combustión (mm)	381
Longitud cámara (mm)	2958
Número de orificios	14
Diámetro de orificio. (mm)	64 a 92

Fuente: Propia del autor.

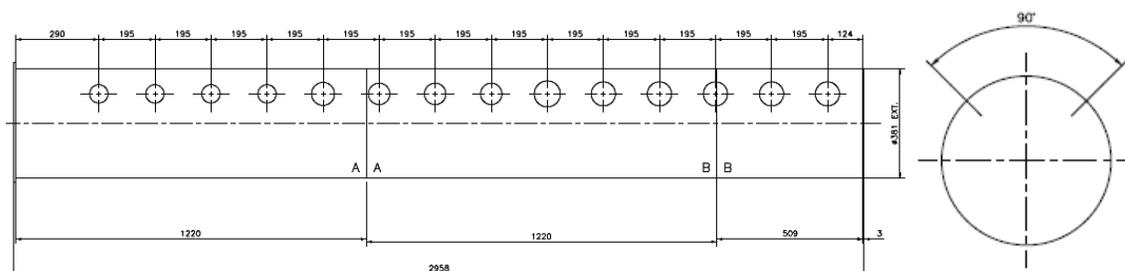


Figura 22. Diseño cámara de combustión.

Fuente: Propia del autor.



Figura 23. Camara de combustión.

Fuente: Propia del autor.

6.2 Ventiladores centrífugos de recirculación del aire.

Un ventilador mueve el aire utilizando la fuerza centrífuga generada por un rotor en movimiento. “Es un dispositivo que aumenta ligeramente la presión del aire, su objetivo es mover el fluido de un sitio a otro”. (Kenneth & Donald E., 2001, p. 198.).

Al horno se le instaló dos ventiladores centrífugos de tipo (BCS) de aletas con perfil aerodinámico para la recirculación de aire dentro del horno, con potencia instalada de 4 hp cada uno, transmisión por polea y banda, contará con rueda de enfriamiento para disipación de temperatura en el eje, de diámetro 7 pulgadas.

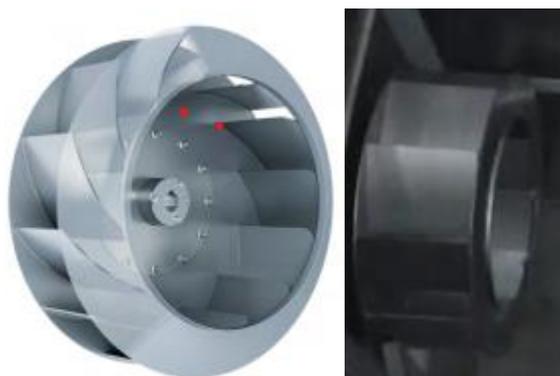


Figura 24. Ventilador centrífugo instalado. Tipo BCS.

Fuente: Propia del autor.

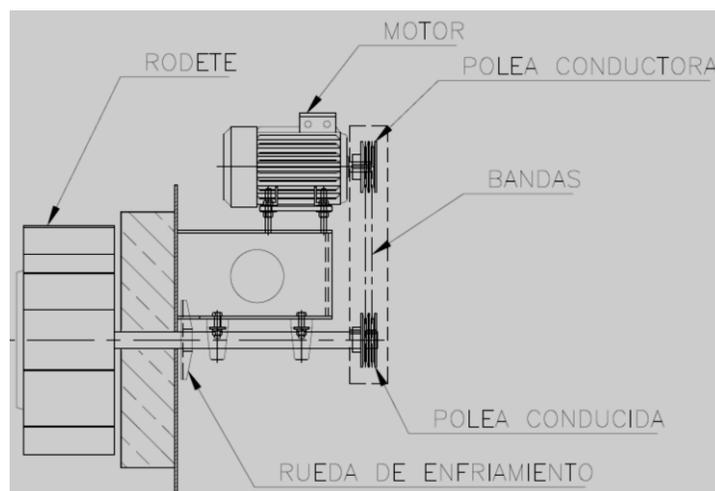


Figura 25. Esquema ventilador centrifugo.

Fuente: Propia del autor.

Tabla 9.

Especificaciones técnicas de ventiladores.

Polea conductora 2 canales	Tipo B, Diám. 180 mm
Polea conducida 2 canales	Tipo B. Diam. 230 mm
Banda B_53	
Soporte chumacera	Tipo pedestal 1 5/8"
Rueda de enfriamiento	7 Pulg- Aluminio
Motor trifásico	4 hp -1750 rpm.

Fuente: Propia del autor.

6.3 Diseño estructural del horno.

El objetivo del diseño estructural del horno: es desarrollar una estructura robusta adecuándose a las longitudes establecidas por el horno a reformar, que soporte las condiciones operativas del horno y garantice su funcionamiento seguro. Este proceso implica:

Análisis de requerimientos: Se identifican los requisitos de carga, dimensiones y características operativas del horno, considerando factores como el tamaño del horno, la capacidad de carga, las temperaturas de funcionamiento. Ver Tabla 10.

Tabla 10.

Análisis de requisitos del horno.

ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS		
Tamaño del horno	Ancho:	2098 mm
	Largo:	3240 mm
	Alto:	1991 mm
Capacidad de carga:	350 kg	
Temperaturas de funcionamiento:	480 °C	

Fuente: Propia del autor.

Selección de materiales: La selección de los materiales adecuados para la construcción de la estructura del horno, se tiene en cuenta su resistencia mecánica, durabilidad y capacidad para soportar altas temperaturas y ambientes corrosivos.

Diseño de la estructura: Desarrollar un diseño detallado de la estructura del horno, incluyendo elementos como paredes, techos, suelos, marcos y soportes, asegurando que cumplan con los requisitos de resistencia, estabilidad y seguridad.

Consideraciones de seguridad: Incorporar medidas de seguridad en el diseño estructural para prevenir riesgos como el colapso de la estructura, fugas de calor o la exposición a sustancias peligrosas.

Optimización del diseño: Realizar iteraciones en el diseño para optimizar la eficiencia y el rendimiento del horno, minimizando pérdidas de calor, mejorando la distribución del flujo de aire y garantizando una circulación homogénea en la cámara de combustión.

Validación del diseño: Realizar pruebas y simulaciones para validar el diseño estructural del horno, asegurando su capacidad para cumplir con los requisitos operativos y de seguridad establecidos.

Estará conformada por estructura metálica en acero al carbón, para la parte externa, acero inoxidable para la parte interna, con un aislamiento en manta cerámica de 120 mm de espesor, chasis principal en perfilaría de 120x120mm soldada.

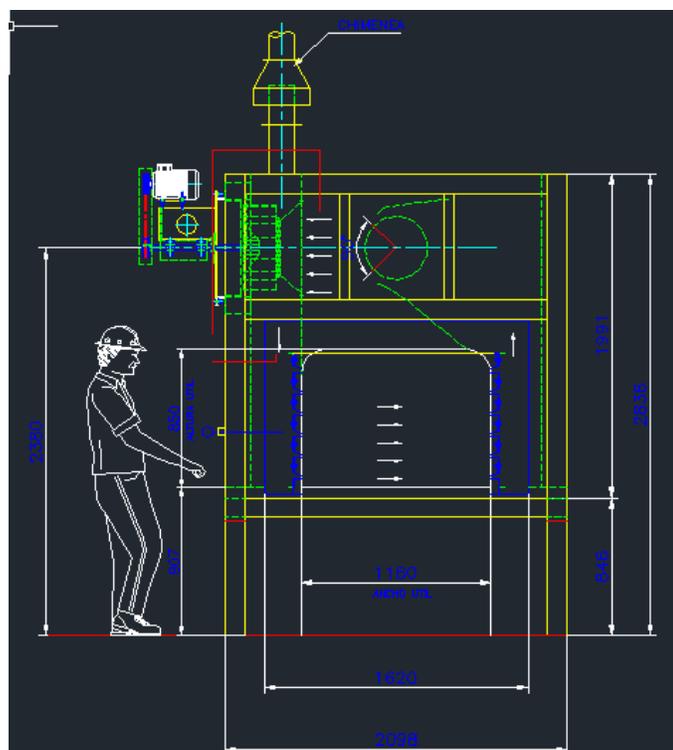


Figura 26. Adecuación horno de quemado PTFE. Vista lateral. Esc: 1.25.
Fuente: Propia del autor.

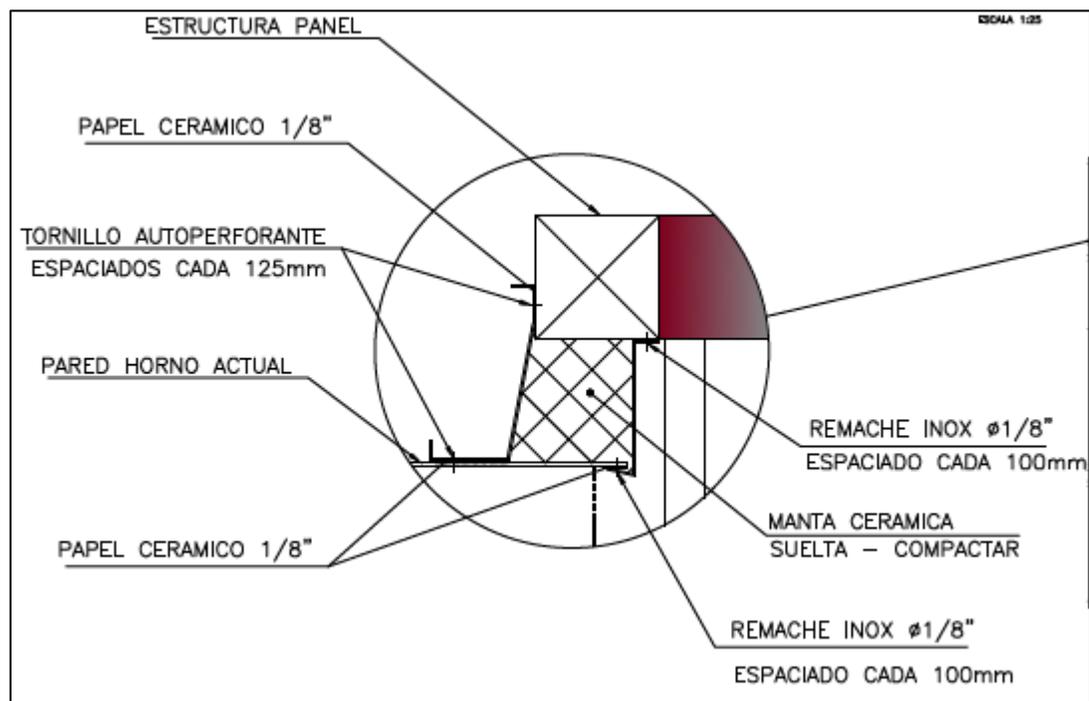


Figura 27 Esquema ensamble lamina exterior.

Fuente: Propia del autor.

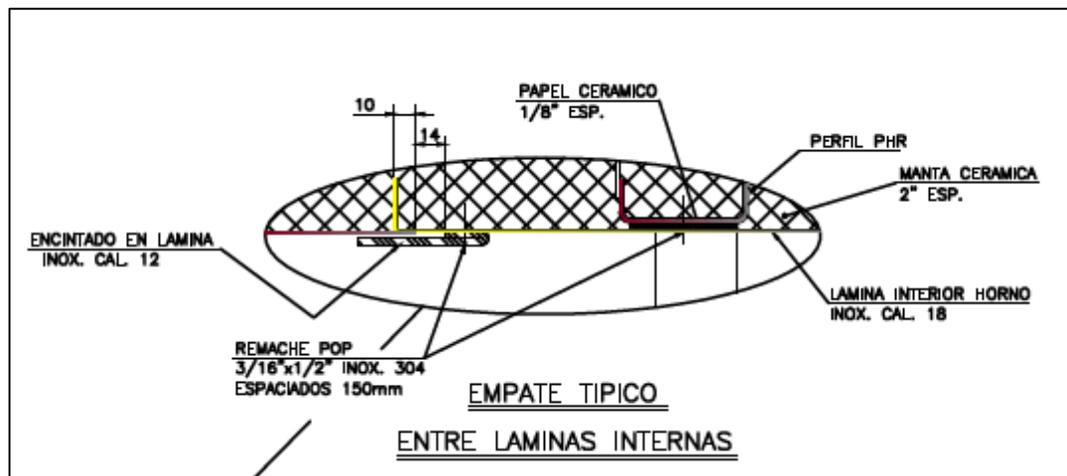


Figura 28. Empalme entre laminas internas.

Fuente: Propia del autor.

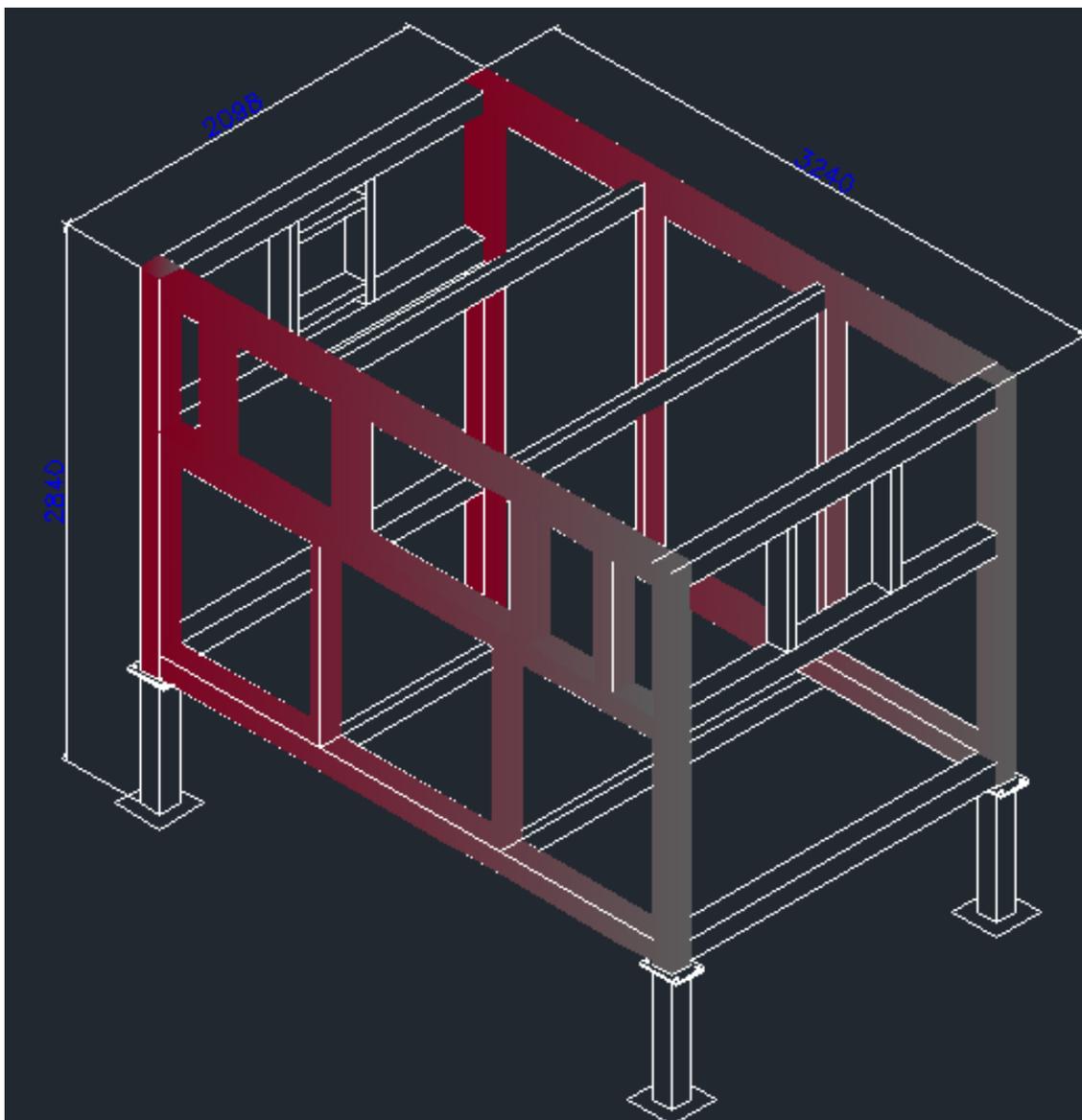


Figura 29. Diseño nueva estructura del horno.
Fuente: Propia del autor.

6.4 Chimenea de evacuación y entrada de aire

Se instalará una chimenea de diámetro 190 mm fabricada en lámina galvanizada cal. 16, cuenta con sistema de dilución en la parte inferior que permite entrada de aire fresco y por ende la disminución de temperatura en los gases de salida al ambiente, provista de una válvula tipo mariposa para regulación de los gases de salida desde el interior del horno. Adicionalmente el

equipo poseerá un damper (válvula mariposa) para entrada de aire de renovación al interior del horno con sistema de regulación que facilitará la calibración del mismo en un punto de operación determinado.

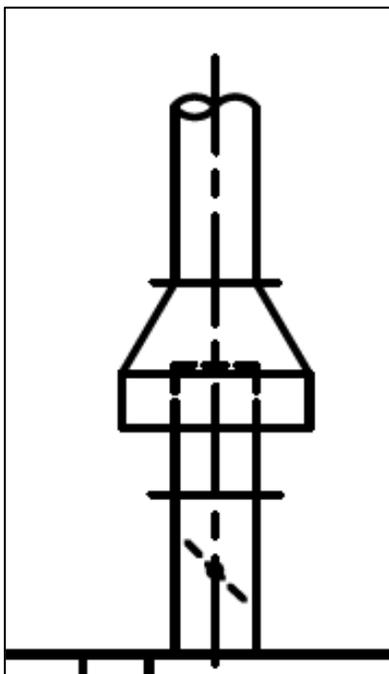


Figura 30. Esquema chimenea de evacuación de gases.

Fuente: Propia del autor.

6.5 Baffles deflectores de distribución de aire

El flujo al interior del horno conservará un flujo transversal horizontal ascendente, esto se logra mediante la instalación de baffles deflectores al interior del equipo fabricados en acero inoxidable, dichos baffles cuentan con un sistema de regulación del tamaño de la ranura para permitir la buena distribución del flujo de aire al interior de la zona de trabajo.

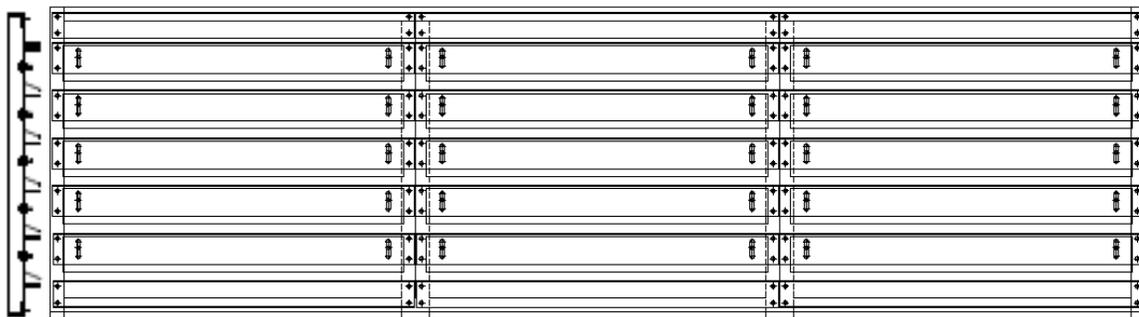


Figura 31 Diseño baffles deflectores de aire.

Fuente: Propia del autor.

6.6 Reforma eléctrica y de instrumentación

El nuevo tablero de control cuenta con todas las protecciones eléctricas necesarias para garantizar la seguridad del sistema; un breaker totalizador 3*40Amp., dos disyuntores termomagnéticos, debidamente calculados para los variadores de frecuencia, y dos disyuntores termomagnéticos, uno para el control y la otra protección eléctrica del quemador de gas. El tablero eléctrico, cuenta con dos selectores, un selector general para el des energizado del sistema eléctrico de control, y otro selector de muletilla para el energizado y des energizado del quemador de gas. Se instalaron dos paros de emergencia, uno en la parte frontal del tablero y otro finalizando el horno con el objetivo de que el operario tenga mayor control del sistema.

Se cuenta con dos variadores de frecuencia, los cuales ajustan la operación a los motores de los ventiladores centrífugos de recirculación de aire, posibilitando variar la frecuencia independientemente a cada sistema del ventilador. Se realizó el control de los variadores de frecuencia instalando, por cada dispositivo, dos pulsadores para el start y stop; al igual un piloto luminoso de visualización, que nos da aviso de que los dispositivos están en run.

El tablero incluye tres controles de procesos Maxthermo; uno para el control alto-bajo del quemador con una alarma por sobre temperatura y los otros dos controles para la visualización de la variable de temperaturas y protección por sobre temperatura.

Se instalaron tres termocuplas tipo K, un para el control y las otras dos para visualización de la variable de temperatura en las otras dos zonas del horno; dos switches de presión de aire para garantizar el debido flujo de aire de cada ventilador de recirculación de aire.



Tabla 11. Controles de proceso, indicadores de funcionamiento y sistema de pulsadores para el control del horno.

Fuente: Propia del autor.

Para el control por sobre temperatura se instala un termostato en la salida de los gases de combustión, protegiendo el sistema de posibles averías, apagando por completo el quemador de gas.

7 Conclusiones

- La concepción y desarrollo de una cámara de combustión optimizada para el horno de convección forzada ha sido fundamental para alcanzar los objetivos del proyecto. La implementación de esta cámara de combustión ha sido un hito significativo en la mejora del rendimiento del horno, permitiendo una distribución uniforme del calor y una temperatura controlada de manera precisa en su interior.
- La reforma integral del horno de convección forzada ha resultado en una mejora en su eficiencia operativa. La instalación de una nueva cámara de combustión, el rediseño del sistema de recirculación de aire y la optimización de la distribución del flujo de aire han contribuido a un calentamiento más homogéneo y eficiente de los materiales.
- La implementación de medidas de seguridad, tanto en el diseño estructural como en el sistema eléctrico, ha aumentado la seguridad operativa del horno. La instalación de dispositivos de protección eléctrica, controles de proceso y paros de emergencia ha reducido los riesgos potenciales de accidentes y ha proporcionado una mayor tranquilidad al personal operativo.
- Optimización del Control y Monitoreo: La reforma eléctrica ha permitido una mejora significativa en el control y monitoreo del horno. La instalación de un nuevo tablero de control con controles de proceso y dispositivos de medición ha facilitado la supervisión precisa de las variables operativas clave, (la temperatura) lo que contribuye a una gestión más eficiente del proceso de calentamiento.

8 Bibliografía

AGA AB. (1993). *Verdades acerca de: Gases combustibles*. 27.

Angulo, A. (2023, septiembre 3). Suministros Ingeniería y Soluciones SIS SA. Recuperado 13 de mayo de 2024, de SIS SA Suministros Ingeniería y Soluciones website:

<https://sissa.com.co/>

Antyre. (2019a). Antyre. Recuperado 24 de febrero de 2024, de Antyre website:

<https://antyresas.com/>

Antyre. (2019b). QUIENES SOMOS. Recuperado 24 de febrero de 2024, de Antyre website:

<https://antyresas.com/quienes-somos/>

Arenado. (2023). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Arenado&oldid=155286028>

Brown Lemay, B. (1998). *Química la ciencia central*. (7a. Ed.). Mexico: Pearson, Prentice Hall.

Cantos, C., & Esteban, J. (2019). *Diseño, construcción e implementación de un horno de curado para pintura electrostática*. 125.

Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial* (Octava edición.). Marcombo.

Ebnesajjad, S. (2016). *Expanded PTFE Applications Handbook: Technology, Manufacturing and Applications*. William Andrew.

FORMATO Memorias de Cálculo Red Interna Gas Natural Industria V2 0.docx. (2023).

Recuperado 28 de mayo de 2023, de

<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.epm.com.co%2Fsite%2FPortals%2F3%2FFORMATO%2520Memorias%2520de%2520C%25C3%25>

A11culo%2520Red%2520Interna%2520Gas%2520Natural%2520%2520Industria%2520V2%25200.docx&wdOrigin=BROWSELINK

Funcionamiento del Sector. (2024). Recuperado 6 de abril de 2024, de

<https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/>

Guerrero-Vacas, G. R. (2013). *Análisis comparativo de los procesos de eliminación de recubrimientos antiadherentes fluoropoliméricos en superficies metálicas entre tecnologías láser y pirolíticas*. Recuperado de

<https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/5482>

ING-FT-101-Manta-fibra-ceramica-SIS-1260°C.pdf. (s. f.-b). Recuperado de

<https://sissa.com.co/wp-content/uploads/2023/10/ING-FT-101-Manta-fibra-ceramica-SIS-1260%C2%B0C.pdf>

Kenneth, W., & Donald E., R. (2001). *Termodinámica* (6a. Edición.). Aravca (Madrid): Mcgraw-Hill/interamericana de españa, S.A.U.

Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2012). *Principios de transferencia de calor* (Séptima Edición). México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.,.

Manual de Ingeniería de Gas Natural—2ª Edición. (2023). Recuperado 5 de mayo de 2023, de

<https://www.elsevier.com/books/natural-gas-engineering-handbook/guo/978-1-933762-41-8>

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverte.

Politetrafluoroetileno. (2024a). Recuperado 25 de marzo de 2024, de

<http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/politetrafluoroetileno>

Politetrafluoroetileno. (2024b). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado de

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Politetrafluoroetileno&oldid=156945822>

Propiedades del Teflon | Tecnimacor. (2015). Recuperado 24 de marzo de 2024, de

<https://www.tecnimacor.es/propiedades-del-teflon/>

¿QUIERE SABER MÁS? (2019). Recuperado 8 de mayo de 2023, de Antyre website:

<https://antyresas.com/quiere-saber-mas/>

Rae, P. J., & Dattelbaum, D. M. (2004). The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in

compression. *Polymer*, 45(22), 7615-7625. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.08.064>

Riello S. p. A. (2001). *Forced draught burner handbook* (1a edición.). Legnago-Italy.

Rivas. (2024). Normas APA – 6ta (sexta) edición—Presentación trabajos academicos.

Recuperado 6 de abril de 2024, de Normas Apa website: <https://normasapa.co/>

Roy J. Plunkett. (2016, junio 1). Recuperado 8 de mayo de 2023, de Science History Institute

website: <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/roy-j-plunkett>

TEMPERATURA.pdf. (2008. Recuperado de

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6305/1/TEMPERATURA.pdf>

Termopar Industrial Con Vaina Metálica de Protección—TC S.A. (2024). Recuperado 28 de abril

de 2024, de <https://www.tc-sa.es/termopares/termopar-industrial.html>

Vanti S.A. ESP. (2024). Sobre el Gas Natural—Grupo Vanti. Recuperado 6 de abril de 2024, de

<https://www.grupovanti.com//conocenos/quienes-somos/sobre-el-gas-natural>

Ventiladores Centrífugos: Grupoambiental.gkl. (2023, junio 11). Recuperado 6 de abril de 2024,

de <https://grupoambiental-gkl.webnode.com.co/ventiladoras/>

Yunus A, C. (2007). *Transferencia de calor y masa un enfoque practico* (Tercera edición).

México: Mcgraw-Hill/interamericana editores, S.A. de C.V.

9 Anexos

Anexo 1. Compromiso para proyecto de grado.



Medellín, 31 de mayo de 2023

Señores
COMITÉ DE TRABAJO DE GRADOS
INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
Medellín

Asunto: Compromiso para proyecto de grados

Como Representante Legal de la compañía LOGITEC SOLUTIONS SAS, para la cual labora el señor JOHN JARVY AGUDELO MESA, identificado con cédula de ciudadanía 71230659, certifico que los gastos para el proyecto de grado del empleado en mención serán asumidos por la compañía ya que es un proyecto del cual también nos veremos beneficiados.

Para cualquier información adicional favor comunicarse al celular 3104075066.

Cordialmente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Camilo Andres Sanchez Cano".

CAMILO ANDRES SANCHEZ CANO
Representante Legal
C.C. 98632261

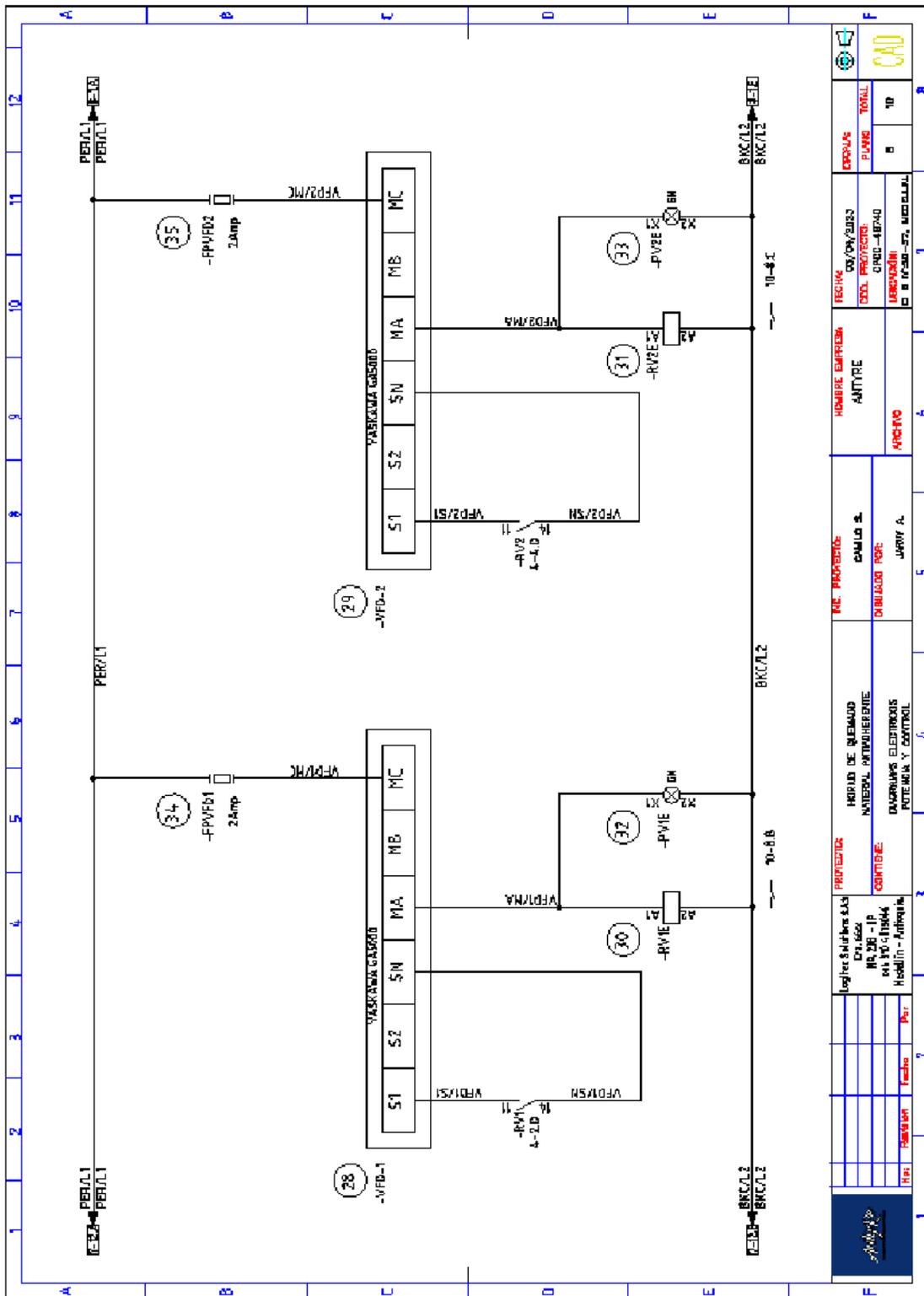
CONVENCIONES			REF	MARCA
1	-BKT	BREAKER TOTALIZADOR 3*40Amp.	9572	NOARK
2	-BKV1	BREAKER VARIADOR DE VELOCIDAD 1. (3*16Amp).	9564	NOARK
3	-BKV2	BREAKER VARIADOR DE VELOCIDAD 2. (3*16Amp).	9564	NOARK
4	-BKQ	BREAKER QUEMADOR DE GAS. (2*6Amp).	09534	NOARK
5	-BKC	BREAKER CONTROL (2*2Amp).	9528	NOARK
6	-VFD1	VARIADOR DE FRECUENCIA #1 (YASKAWA GA 500)	GA 500	YASKAWA
7	-VFD1	VARIADOR DE FRECUENCIA #2 (YASKAWA GA 500)	GA 500	YASKAWA
8	-CQ	CONTACTOR QUEMADOR (09A-220VAC).	NC1-0910	SCHNEIDER
9	-MRV1	MOTOR RECIRCULACIÓN VARIADOR #1. (4HP, 220Vac)	W22	WEG
10	-MRV2	MOTOR RECIRCULACIÓN VARIADOR #2 (4HP, 220Vac)	W22	WEG
11	-SG	SELECTOR GENERAL.	S2SR-S4WA	AUTONICS
12	-PE	PARO DE EMERGENCIA Ø 40mm TABLERO DE CONTROL.	S2ER-E3RB	
13	-PER	PARO DE EMERGENCIA REMOTO.		
14	-TE	VOLTIMETRO DIGITAL TABLERO ENERGIZADO.	AD22-DVM	
15	-S1	PULSADOR (STAR VFD1)	S2SR-S4WA	AUTONICS
16	-S2	PULSADOR (STOP VFD1)	S2PR-P1RB	AUTONICS
17	-RV1	RELAY VARIADOR DE FRECUENCIA #1.-(230Vac)	94,0400	FINDER
18	-S3	PULSADOR (STAR VFD2)	S2SR-S4WA	AUTONICS
19	-S4	PULSADOR (STOP VFD2)	S2PR-P1RB	AUTONICS
20	-RV2	RELAY VARIADOR DE FRECUENCIA #2.-(230Vac)	94,0400	FINDER
21	-CT	CONTROL DE PROCESOS MAXTHERMO- PROCESO.	5438	MAXTHERMO
22	-TC	TERMOCUPLA DE CONTROL TIPO K		
23	-CTV1	CONTROL DE PROCESOS MAXTHERMO VISUALIZACIÓN 1	5438	MAXTHERMO

Logo: Saudi Gas S.A.S D.L. 6622 R.L. 206 - IP C.I. 10-011844 Medellin - Antioquia	PROCESOS MOTOR DE RELEADO MOTOR RECIRCULACION CONTROLES OPERACIONES ELECTRICAS MANTENIMIENTO Y CONTROL	VAL. PROYECTOS CANTIDAD S. REQUERIDO POR UNIDAD A.	NOMBRE EMPRESA AMITRE	FECHA 05/04/2023 CANT. REVISIONES 002-40740 UBICACION CALLE 1754-57, MEDALLA.	ESCALA PLANTA TOTAL 2 10	CAO
---	---	---	--------------------------	--	--------------------------------	-----

ITEM		TAG	DESCRIPCIÓN	REF	MARCA
24	-TCZ1		TERMOCUPLA ZONA 1 (TIPO K)		
25	-CTV2		CONTROL DE PROCESOS MAXTHERMO VISUALIZACIÓN 2	5438	MAXTHERMO
26	-TCZ2		TERMOCUPLA ZONA 1 (TIPO K)		
27	-RAT		RELAY SOBRETENPERATURA (230-240Vac)	34.51.7.060.0010	FINDER
28	-VFD-1		VARIADOR DE FRECUENCIA MOTOR RECIRCULACIÓN 1	GA500	YASKAWA
29	-VFD-2		VARIADOR DE FRECUENCIA MOTOR RECIRCULACIÓN 2	GA500	YASKAWA
30	-RV1E		RELAY VENTILADOR RECIRCULACIÓN 1 ENERGIZADO	94_0300	FINDER
31	-RV2E		RELAY VENTILADOR RECIRCULACIÓN 2 ENERGIZADO	94_0300	FINDER
32	-PV1E		PILOTO VARIADOR DE FRECUENCIA 1 ENERGIZADO.	ND16-22DS/4G110	CHINT
33	-PV2E		PILOTO VARIADOR DE FRECUENCIA 2 ENERGIZADO.	ND16-22DS/4G110	CHINT
34	-FPVFD1		FUSIBLE PROTECCIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA 1		
35	-FPVFD2		FUSIBLE PROTECCIÓN VARIADOR DE FRECUENCIA 2		
36	-MQ		MOTOR QUEMADOR DE GAS		
37	LME 22		CAJA DE CONEXIÓN CONTROL BOX	LME 22-233C2RL	SIEMENS
38	-EVC		KIT DE VENTILACIÓN CONTINUA		PARKER
39	-II		TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN		
40	MONOBL OQUE		ELECTRO VALVULA MONOBLOQUE		DUNGS
41	-QE		PILOTO QUEMADOR DE GAS ENCENDIDO	ND16-22DS/4G110	CHINT
42	-FQ		PILOTO ROJO FALLA QUEMADOR DE GAS		
43	-PA		PRESOSTATO DE AIRE	LGW 3 A2	DUNGS
44	-ION		SONDA DE IONIZACIÓN.		
45	-SQ		SELECTOR QUEMADOR DE GAS (ON, OFF)	S2SR-S4WA	
46	-PGMin		PRESOSTATO MÍNIMA PRESIÓN DE GAS.	PGR-F	BRAHAMA

Log In: 8/11/2016 8:53		PROYECTO:		MC - PROYECTO:		FECHA:		CAD	
DR. 000		HECHO DE QUEMADO		CANTIDAD:		CANTIDAD:		CANTIDAD:	
R# 200 - IP		MATERIAL ENTREGADO		CANTIDAD:		CANTIDAD:		CANTIDAD:	
01110-010044		CANTIDAD ELECTRICAS		CANTIDAD:		CANTIDAD:		CANTIDAD:	
Headlin - Autopark		POTENCIA Y CONTROL		CANTIDAD:		CANTIDAD:		CANTIDAD:	
Por:	Fecha:	Por:	Fecha:	Por:	Fecha:	Por:	Fecha:	Por:	Fecha:

Continuación anexo 3



		No. Proyecto: PAULO S. Diseñador: JERRY A.		Nombre Empresa: AMTIRE		Fecha: 05/05/2023 Proyecto: CRUD - APT40		Expediente: 10 Folio: 10			
Ingenieros S. de RL Dr. Jose No. 20 - 1P 011 300 01044 Medellín - Antioquia		No. Proyecto: PAULO S. Diseñador: JERRY A.		Nombre Empresa: AMTIRE		Fecha: 05/05/2023 Proyecto: CRUD - APT40		Expediente: 10 Folio: 10		CAD	

Anexo 4. Ficha técnica manta cerámica.

	MANTA FIBRA CERÁMICA SIS 1260°C	Código: ING-FT-101
		Versión: 01
		25/08/2023
		Página 1 de 3



Descripción

Los productos de fibra cerámica SIS poseen excelente Resistencia al ataque químico. Algunas excepciones son el ácido hidroclicórico, ácido fosfórico y álcalis fuertes (Ej.: Na₂O, K₂O) El agua y el aceite no afectan la manta SIS. Las Propiedades físicas y térmicas se restablecen después de secarse.

Análisis Químico

Análisis químico	% Peso
Al ₂ O ₃	45.0
SiO ₂	53.0
Fe ₂ O ₃	1.0
TiO ₂	1.7
CaO	0.1
Na ₂ O	0.2

Valor R: El valor "R" para la fibra cerámica se define como el inverso del valor "K" multiplicado por el grosor (en pul.). El valor R a 21° C según ASTM C 518-76 para 1", # 6 es 4.15/pul.

Descripción

La manta SIS es producida a partir de Caolín, una arcilla silico-aluminosa de extracción natural. Las fibras silico-aluminosas resultantes de alta calidad, son dispuestas en arreglos de capas con aire en una matriz continua, mecánicamente cosida para proporcionarle integridad a la superficie y adicionarle resistencia a la tensión. Disponible en una amplia variedad de densidades y dimensiones. La manta SIS ofrece excelente manejabilidad y estabilidad a alta temperatura lo que le permite ajustarse a diversas aplicaciones como aislante de respaldo o directamente sobre la cara caliente de hornos rotatorios, tubería y otros equipos que exigen ahorro de energía calorífica.

Disponible en diferentes medidas y densidades.

Suministros, Ingeniería y Soluciones S.A.
Carrera 51 B No 12 sur 72 (PBX) 604 444 18 04
www.sissa.com.co
Medellín – Colombia