



Mejoras tecnológicas en horno de tratamientos térmicos

Andrés Felipe Pérez Restrepo ¹

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero mecánico

Asesor

Daniel Esteban Agudelo Delgado, Magíster en Automatización y control industrial

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Pregrado de Ingeniería Mecánica
Medellín
2022

Cita	Pérez Restrepo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] A. F. Pérez Restrepo, “Mejoras tecnológicas en horno de tratamientos térmicos”, Semestre de industria, Pregrado de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. Marco teórico	11
3.1. Tratamientos térmicos	11
3.1.1. Recocido	12
3.1.2. Normalizado	16
3.1.3. Hornos para tratamientos térmicos	16
3.2. Partes de un horno	17
3.3. Transferencia de calor	19
3.3.1. Conducción	19
3.3.2. Convección	19
3.4. Energía en un horno de tratamientos térmicos	21
3.5. Pérdidas de calor en un horno	22
3.5.1. Pérdidas de calor por las paredes	22
3.5.2. Pérdidas por calor sensible en los gases de combustión	24
3.5.3. Pérdidas por combustión incompleta	24
3.5.4. Pérdidas por vaporización del agua	24
3.6. Eficiencia del horno	25

3.7.	Pruebas y ensayos	25
3.7.1.	Prueba de dureza Leeb	25
3.7.2.	Prueba de dureza Rockwell	26
3.8.	Sistema de control	27
	Controladores lógicos programables	28
	Microcontroladores	28
	Computadores industriales	29
3.9.	Tipos de control	30
4.	Valoración inicial	32
4.1.	Valoración cualitativa	32
	Dimensiones generales	38
4.2.1.	Costo de operación	43
	Consumos:	43
4.3.	Diagnóstico del proceso de recocido	44
4.4.	Eficiencia del proceso	45
4.5.	Condiciones de las piezas al entrar y salir del horno	47
5.	Control del horno	48
6.	Propuestas de mejora	48
7.	Selección de alternativa	50
8.	Sistema de control	51
8.1.1.	Selección de hardware	53
8.1.2.	Programación	55
9.	Procesos de manufactura	57
10.	Pruebas y puesta a punto	58
10.1.	Prueba 1	58

10.2.	Prueba 2	59
10.3.	Prueba 3	59
10.4.	Prueba 4	60
10.5.	Prueba 5	61
10.6.	Prueba 6	62
10.7.	Prueba 7	62
11.	Pruebas de dureza	66
12.	Eficiencia del sistema	67
13.	Resultados del proyecto	68
14.	Conclusiones	69
15.	Referencias	69
16.	Anexos	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Costos de reposición del Horno.	43
Tabla 2.	Costos de operación del horno antes de la intervención.	44
Tabla 3.	Medición de temperatura en prueba de recocido.	44
Tabla 4.	Prueba de dureza antes de la intervención	47
Tabla 5.	Costos estimados de implementación del proyecto.	51
Tabla 6.	Registro de pruebas de dureza.	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Gráficos de tratamiento de los diferentes topes de recocido. Tomada de [3].	14
-----------	---	----

Figura 2. Diagrama hierro- carbono donde se aprecian los valores de las distintas temperaturas de calentamiento para llevar a cabo los diferentes tipos de recocidos: 1) normalizado y recocido total; 2) recocido de globulización; 3) recocido de eliminación de tensiones. Tomada de: [1]	15
Figura 3. Temperaturas de recocido según el contenido de carbono del acero. Tomada de: [2]	15
Figura 4. Temperaturas de recocido según contenido de carbono y proceso de recocido. Tomada de: [4]	16
Figura 5. Sistema térmico de paredes compuestas. Tomada de [10]	23
Figura 6. Esquema de un lazo de control cerrado. Tomada de [13]	27
Figura 7. Respuesta en el tiempo de un control On/Off. Tomada de: [3]	30
Figura 8. Respuesta en el tiempo de un controlador PID. Tomada de:[3]	31
Figura 9. Estado inicial del horno. Elaboración propia.	33
Figura 10. Interior del horno de recocido HR2, ubicación del quemador. Elaboración propia.	34
Figura 11. Puerta del horno. Elaboración propia.	34
Figura 12. Ficha técnica del quemador Baltur BTG 3. Tomada de: [19]	35
Figura 13. Tablero de conexiones para el control del horno. Elaboración propia.	36
Figura 14. Ejemplo 1 de carga en horno de recocido. Elaboración propia.	36
Figura 15. Ejemplo 2 de carga de recocido. Elaboración propia.	37
Figura 16. Carga de la Figura 16 después del recocido. Elaboración propia.	38
Figura 17. Dimensiones generales del horno pequeño en el estado inicial. Elaboración propia.	39
Figura 18. Comparativo de uso de los hornos. Elaboración propia.	40
Figura 19. Selección de horno según dimensiones. Elaboración propia.	41
Figura 20. Selección de horno según carga total. Elaboración propia.	42
Figura 21. Selección de horno según dimensiones y carga total. Elaboración propia.	42
Figura 22. Evolución de la temperatura interior en prueba de recocido. Elaboración propia.	45
Figura 23. Diagrama Sankey del sistema. Elaboración propia.	46
Figura 24. Alternativa de mejora 1. Elaboración propia.	49
Figura 25. Alternativa de mejora 2. Elaboración propia.	49
Figura 26. Piezas necesarias para la remodelación del horno. Elaboración propia.	50
Figura 27. Ensamble del sistema propuesto. Elaboración propia.	51
Figura 28. Función de pertenencia del error. Elaboración propia.	52
Figura 29. Función de pertenencia del cambio en el error. Elaboración propia.	53

Figura 30. Caja de control. Elaboración propia.	54
Figura 31. Tablero de control del horno. Elaboración propia.	55
Figura 32. Interfaz de usuario. Elaboración propia.	56
Figura 33. Resultado final de la fabricación. Elaboración propia.	58
Figura 34. Diferencias en la lectura de temperatura en la zona de la solera y la cúpula. Elaboración propia.	60
Figura 35. Temperatura de piezas finalizando la prueba 7. Elaboración propia.	63
Figura 36. Carta de color para tratamientos térmicos del acero. Tomada de:[21]	63
Figura 37. Ubicación recomendada para termocuplas en procesos de calentamiento. A: Sistema estático, B: Sistema dinámico, C: Combinación de sistemas estático y dinámico. Adaptada de: [22]	64
Figura 38. Reubicación de la termocupla. Elaboración propia.	65
Figura 39. Evolución de la temperatura en la prueba 1. Elaboración propia.	65
Figura 40. Evolución de la temperatura en la prueba 7. Elaboración propia.	66
Figura 41. Eficiencia del proceso en las condiciones finales.	67
Figura 42. Comparativo de consumo de gas para los hornos de la empresa. Elaboración propia.	68

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CNC	Control Numérico Computarizado
AISI	American Iron and Steel Institute
SAE	Society of Automotive Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
PLC	Programmable Logic Controller
ROM	Read Only Memory
RAM	Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
PID	Proportional Integrative and Derivative control
HR2	Horno de recocido 2
TGI	Transportadora de Gas Internacional
LCD	Liquid Crystal Display

IDE	Integrated Development Environment
CAD	Computer Asisted Design
ASM	American Society for Metals
IOT	Internet Of Things

RESUMEN

Se presenta el estudio de las condiciones del proceso de recocido en un horno de tratamientos térmicos de la empresa Ferrocortes GM y CIA teniendo en cuenta las necesidades actuales de la compañía en cuanto a capacidad de producción, dimensiones de las piezas y masa de las piezas tratadas térmicamente en la empresa, así como el diseño e implementación de mejoras tecnológicas que satisfacen las necesidades identificadas, que incluyen aumento en la capacidad del horno, reubicación de los elementos de medición, implementación de sistema de control difuso e interfaz de usuario web, permitiendo de ese modo la implementación de elementos de la industria 4.0 en los procesos de la empresa y facilitando la operación, monitoreo y control de uno de los hornos. Adicionalmente se presenta el estudio económico de la implementación de las mejoras y la proyección de retorno de la inversión del proyecto.

***Palabras clave* — Tratamientos térmicos, Recocido, Control difuso, Industria 4.0, ESP32.**

ABSTRACT

A study of conditions conducted in the annealing process in a heat treatment furnace of Ferrocortes GM & CIA is presented. The study took into account the current needs of the company regarding to production capacity, dimensions of the heat treated pieces and weight of the batches. Further the design and implementation of technological improvements to satisfy the identified needs are described, including the capacity increase of the furnace, relocation of the measuring elements, fuzzy control implementation and web based user interface. These actions led to the implementation of 4.0 elements into the business process, facilitating the operation, monitoring and control of one furnace. In addition, the economic study of implementing the project and the investment return projection are presented.

***Keywords* — Heat treatment, Annealing, Fuzzy control, 4.0 Industry, ESP32.**

1. Introducción

Ferrocortes GM y Cia S.A.S es una empresa dedicada a la importación, comercialización y transformación de elementos en acero de diversos tipos, enfocada a la satisfacción de sus clientes mediante la calidad de sus procesos. Siendo importadores directos de las mayores siderúrgicas del mundo son proveedores nacionales para todo tipo de empresas. Dispone de tres plantas a nivel nacional (Dos en Medellín y una en Cartagena) en las que se desarrollan diferentes actividades relacionadas con la comercialización de material como materia prima y procesos de transformación de acero.

Dentro de sus procesos de transformación cuenta con equipos de corte de control numérico computarizado (CNC) para aceros de hasta 260 mm de espesor en aceros estructurales, de maquinaria y aceros antidesgaste, que permiten la obtención de geometrías precisas y repetibles en tiempos muy cortos. Durante el corte de acero AISI SAE 1045 las elevadas temperaturas de corte y el contacto con el aire ocasionan un cambio de la microestructura del material, volviéndolo más duro que en su estado habitual e inadecuado para procesos de mecanizado, por lo que se hace necesario realizar un tratamiento térmico de recocido a las piezas cortadas en este material para ablandar la superficie preparándola para los procesos que los clientes requieran.

Actualmente se cuenta con dos hornos para realizar el tratamiento térmico a las piezas. Uno de ellos tiene una capacidad para tratar 1700 kg y el otro tiene una capacidad para 300 kg. Durante el tratamiento térmico que se realiza actualmente se han evidenciado piezas que sufren una oxidación excesiva por el contacto directo con la llama y otras que no alcanzan el nivel de dureza esperado del tratamiento. Además, se han identificado piezas que presentan descarburación después del proceso de recocido.

De los dos hornos, el horno con mayor capacidad es el que más cantidad de trabajos recibe, procesando el 95.99% del material recocido según registros de tiempos de trabajo del año 2021. La distribución del trabajo se realiza de esta forma debido a que la experiencia ha mostrado mayor uniformidad de recocido en piezas de tamaños considerablemente grandes al emplear el horno grande debido a la distribución de la temperatura dentro del mismo.

Dada esta situación, se presenta la posibilidad de mejorar el horno de recocido pequeño buscando una mejor distribución de la temperatura dentro del mismo, de forma que se le pueda dar uso constante y sea más equitativa la distribución de trabajos de recocido para cada horno en función de su capacidad. Adicionalmente, la diversidad de espesores de lámina que maneja la

compañía, que va desde los 3 mm hasta los 260 mm da cuenta de la necesidad de implementar un sistema de control para los hornos que permita adecuar las curvas de tratamiento al espesor y tipo de material de las piezas.

Las propuestas de mejora estarán basadas en análisis de diseños probados en hornos de tratamientos térmicos y revisión bibliográfica, así como en visitas técnicas a centros especializados en tratamientos térmicos y análisis del contexto operacional de la sede Guayabal de Ferrocortes, centrándose en el proceso de recocido.

Al implementar estas propuestas se espera estandarizar el proceso de recocido en la empresa y obtener piezas con dureza uniforme, apuntando a la calidad de los productos terminados, contribuyendo a la filosofía de la empresa.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar propuestas de mejoras para el proceso de recocido teniendo en cuenta el volumen de trabajo y las dimensiones de las piezas que actualmente se procesan en el horno de recocido de la empresa buscando la calidad de las piezas recocidas y la satisfacción de los clientes.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del proceso de recocido con el fin de detectar aspectos en los que sea necesario implementar mejoras, teniendo en cuenta metodologías empleadas en la fabricación de hornos y propiedades de los materiales usualmente recocidos en la empresa.
- Diseñar propuestas de modernización del horno desde los aspectos estructural y de control, en pro de mejorar las condiciones de operación y garantizar un correcto recocido del material teniendo en cuenta aspectos económicos y requerimientos técnicos.
- Implementar la alternativa de mejora para el proceso de recocido más adecuada para la compañía, a la vez que se valide el cumplimiento de los resultados esperados.

3. Marco teórico

3.1. Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico de los metales es el conjunto de ciclos de calentamiento y enfriamiento controlados a los que se somete a los metales para modificar su microestructura y

propiedades [1]. La naturaleza, proporción y distribución de los constituyentes de los metales y aleaciones forman la microestructura del material, la cual puede llegar a cambiar dependiendo de las reacciones en estado sólido que tengan lugar.

Existen diferentes tratamientos térmicos dependiendo de las propiedades mecánicas que se espera obtener con su aplicación. Se consideran en este caso únicamente los tratamientos térmicos que tienen como fin disminuir la dureza de las piezas.

3.1.1. Recocido

El recocido es el proceso por el cual se calienta un metal por encima de una temperatura adecuada para la transformación, y luego se deja enfriar dentro del horno o enterrándolo en cenizas o cal [2]. Este proceso tiene como finalidad principal ablandar el acero, regenerar la estructura de aceros sobrecalentados o eliminar las tensiones internas que siguen a un trabajo en frío.

Existen varios tipos de recocido dependiendo de cuál sea la finalidad del tratamiento, algunos de los tipos de recocido son:

- **Recocido de regeneración:**

También conocido como recocido total o recocido completo tiene la finalidad de ablandar el acero y regenerar su estructura. Consiste en calentar el acero a una temperatura entre 30 y 40°C por encima de la temperatura crítica A_{c3} (Correspondiente a la temperatura en que la ferrita se transforma en austenita), mantener la temperatura durante un tiempo y dejar enfriar lentamente. De esta forma se obtiene un grano fino que facilita el mecanizado y una perlita más dislocada.

- **Recocido incompleto:**

Elimina las tensiones, pero solo recristaliza la perlita. Suele ser más económico. Se realiza a temperaturas entre A_{c2} (Temperatura a la que el material ferromagnético pasa a ser paramagnético) y A_{c3} .

- **Recocido de globulización:**

Se aplica principalmente a aceros eutectoides e hipereutectoides debido a su baja maquinabilidad por presentar láminas duras de cementita en su microestructura. El recocido globular o de globalización se realiza comúnmente por uno de dos métodos:

1. Permanencia prolongada a una temperatura inmediatamente inferior a la crítica inferior. A_{c1} (Alrededor de 700°C)

2. Empleo de un ciclo oscilante de calentamiento y enfriamiento a temperaturas alrededor de la línea crítica inferior A_{c1} .

- **Recocido de alivio de tensiones:**

Es conocido también como recocido subcrítico o recocido de recristalización, tiene el objetivo de eliminar las tensiones internas que aparecen en el material después de sufrir un fuerte mecanizado u otro proceso de transformación en frío. Se realiza normalmente a temperaturas inferiores a las correspondientes a la línea crítica inferior A_{c1} . [3][4]

- **Recocido de Homogenización**

Elimina la segregación química y cristalina. Se obtiene grano grueso debido a la alta temperatura del proceso. Es necesario un recocido completo posterior.

- **Recocido isotérmico**

Economiza tiempo. Se emplea mucho en los aceros aleados. Se mantiene en baños de sales a temperaturas menores que A_1 hasta que la descomposición de la austenita se produzca y después se enfría al aire.

La Figura 1 presenta un resumen esquemático de las curvas de tratamiento según el tipo de recocido a realizar.

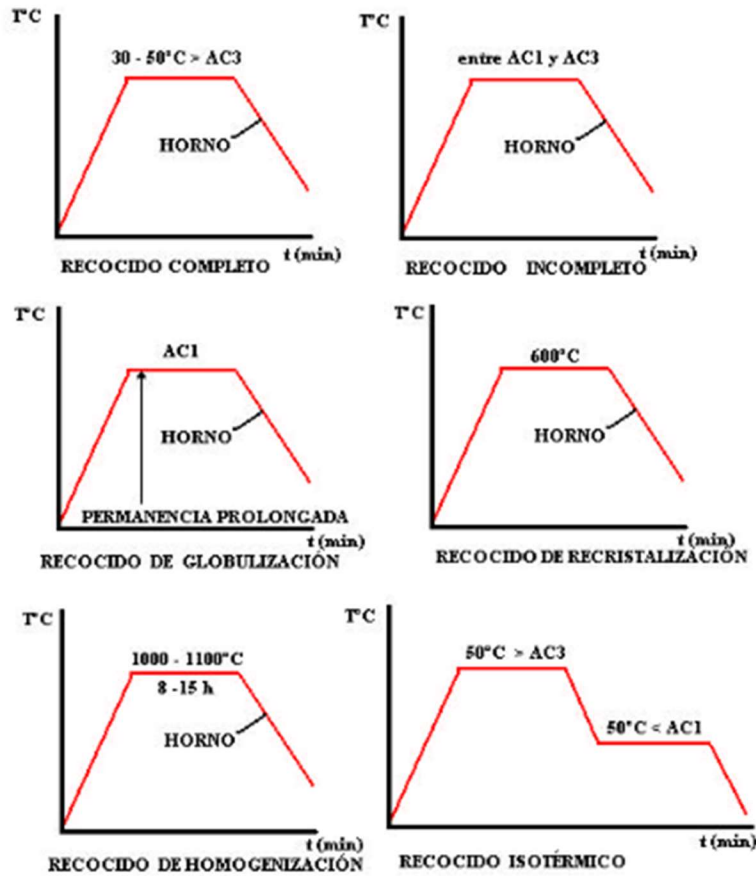


Figura 1. Gráficos de tratamiento de los diferentes tipos de recocido. Tomada de [3].

Dependiendo del tipo de recocido a realizar y de la composición del material a tratar se debe seleccionar una temperatura de proceso. Estas temperaturas difieren en algunos autores, sin embargo, son cercanas en todos los casos. Las figuras 2 a 4 se presentan a modo de guía para la selección de la temperatura del proceso dependiendo del porcentaje de carbono del material a tratar y el tipo de recocido.

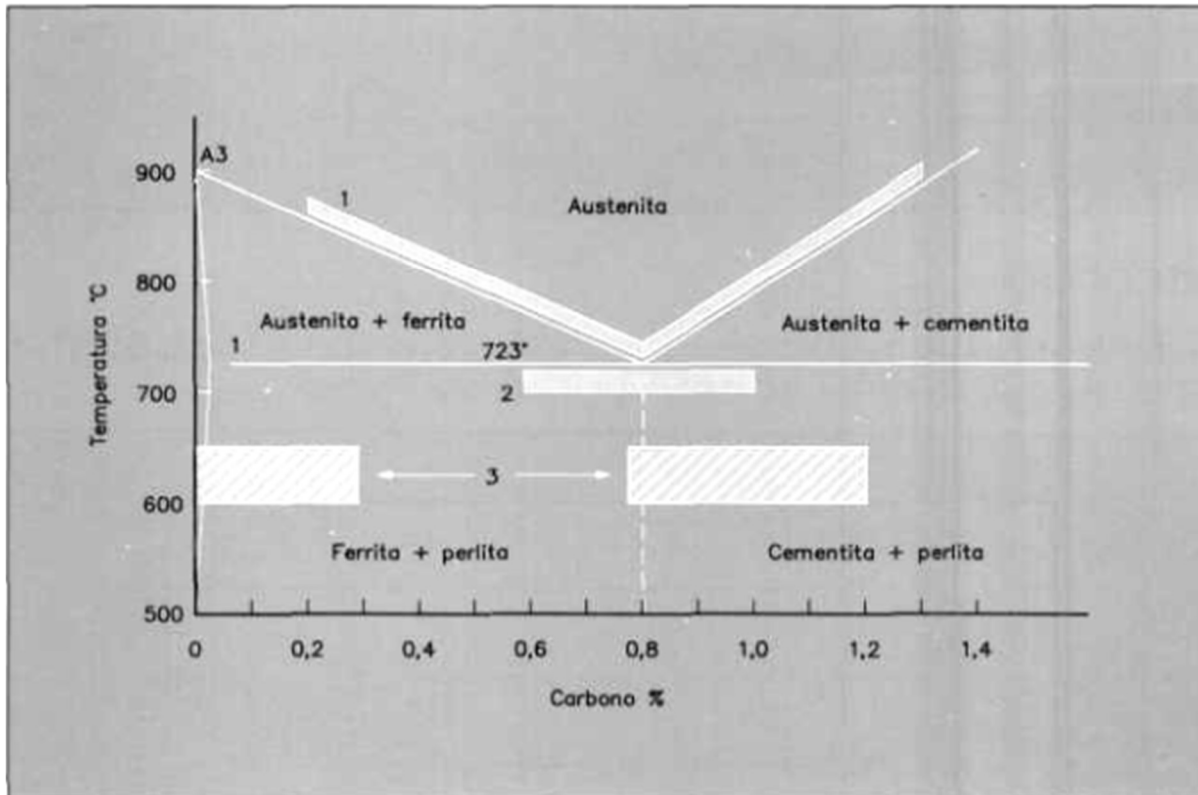


Figura 2. Diagrama hierro- carbono donde se aprecian los valores de las distintas temperaturas de calentamiento para llevar a cabo los diferentes tipos de recocidos: 1) normalizado y recocido total; 2) recocido de globulización; 3) recocido de eliminación de tensiones. Tomada de: [1]

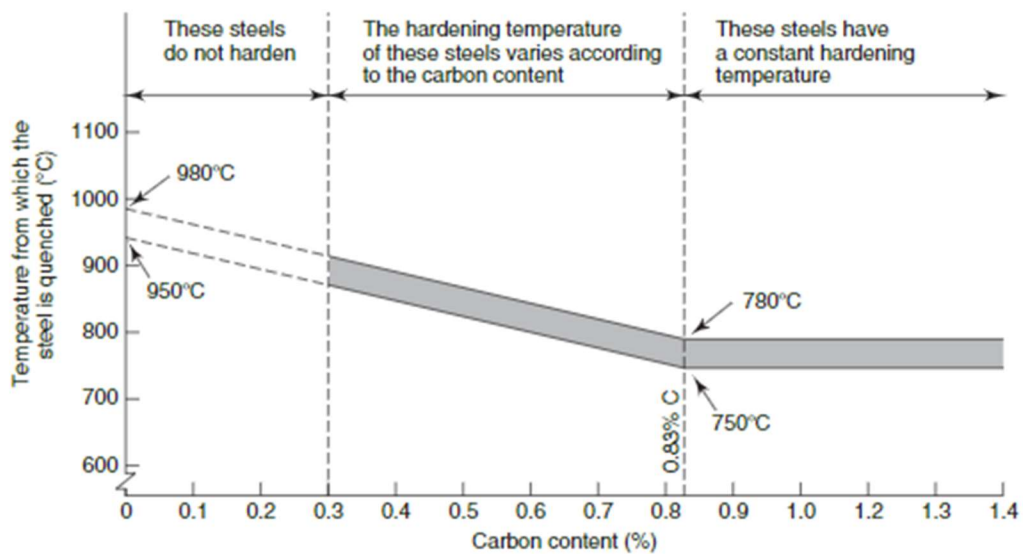


Figura 3. Temperaturas de recocido según el contenido de carbono del acero. Tomada de: [2]

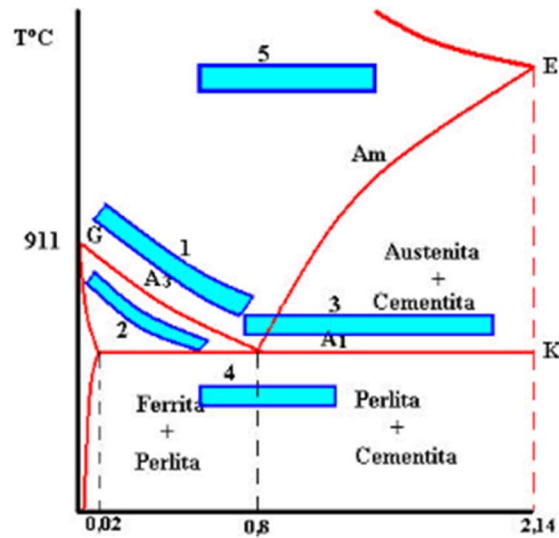


Figura 4. Temperaturas de recocido según contenido de carbono y proceso de recocido. Tomada de: [4]

En todos los casos el tiempo de sostenimiento solo es crítico en el sentido de que debe ser suficiente para que haya homogenización. El tiempo de permanencia depende del tamaño de la sección y no debe exceder una hora por cada 25 mm de espesor de sección, pues el grano puede comenzar a crecer excesivamente.[5]

3.1.2. Normalizado

Es un tratamiento que consiste en calentar el material a una temperatura de 30 a 50°C por encima de A_{c3} seguido de un enfriamiento al aire. Se produce durante este proceso la recristalización y el afino de la perlita. Para aceros con bajo contenido de carbono no aleados no existe mucha diferencia entre el normalizado y el recocido. Para aceros de contenido medio (Entre 0,3 y 0,5% de carbono) la diferencia de propiedades es mayor que en el caso anterior, obteniéndose mayor dureza con el normalizado.

El normalizado tiene como objetivo subsanar efectos de operaciones anteriores de la elaboración en caliente, como lo son la forja y la colada, además de preparar la estructura del acero para operaciones tecnológicas como el mecanizado o el temple. También puede ser un tratamiento térmico final.

3.1.3. Hornos para tratamientos térmicos

El horno de tratamiento térmico no es más que un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado. Se utiliza en la industria con el objetivo de cambiar o mejorar la microestructura del metal. [6]

Las características deseables de un horno de tratamientos térmicos son [2]:

-
- Calentamiento uniforme de las piezas. Previene la distorsión de las piezas debido a expansiones desiguales y asegura una dureza uniforme.
 - Control preciso de la temperatura. La temperatura debe poder ajustarse fácilmente al proceso requerido.
 - Estabilidad de la temperatura. Después de llegar al punto deseado la temperatura debe ser lo más estable posible. Esto se logra asegurando que la masa del refractario sea mayor que la de las piezas de trabajo, por medio de controles automáticos de temperatura o por ambos.
 - Control de la atmósfera. El contacto con aire a altas temperaturas causa reacciones de oxidación en la superficie de las piezas y puede cambiar la composición de las piezas en la superficie. Puede mejorarse esta condición usando gases inertes como atmósfera protectora o realizando el tratamiento de las piezas en sales fundidas. Las atmósferas controladas pueden ser basadas en gas natural, propano o butano. En aplicaciones especiales se usa gas de amoníaco.
 - Uso eficiente de los combustibles. Es de tener en cuenta que resulta más barato mantener los hornos encendidos que hacer ciclos de trabajo espaciados. Esto porque la energía necesaria para elevar la temperatura hasta la temperatura de trabajo desde la temperatura ambiente es mayor que la necesaria para mantenerla después de alcanzada.
 - Bajos costos de mantenimiento. Los hornos son revestidos con materiales resistentes al calor como los ladrillos refractarios. Los hornos deben diseñarse para que el recubrimiento dure el mayor tiempo posible.

3.2. Partes de un horno

Los principales constituyentes de un horno son:

- **Cimientos:** Son la parte que soporta las demás partes del horno, se apoyan directamente en el suelo y aportan solidez para soportar las cargas estáticas y dinámicas a las que esté sometido el horno.
- **Plataforma:** Se ubica sobre los cimientos y debajo de la mampostería. Es la parte que proporciona una superficie sobre la cual se apoyen las demás partes del horno.
- **Solera:** Es la parte en la que se disponen los materiales a tratar, por este motivo debe ser lo suficientemente sólida y químicamente estable.
- **Bóveda:** Es la parte superior interna del horno, es responsable por la recirculación de los gases calientes y debe soportar altas temperaturas y choques térmicos.
- **Paredes:** Rodean la zona de trabajo del horno, protegen la zona interna de pérdidas de calor y no permiten la salida de los gases ni la succión de aire exterior. Idealmente debe ser pareja, limpia y tener juntas delgadas.

A la superficie que define el límite entre el volumen operacional del horno y el exterior se conoce como la envolvente. La envolvente se encarga de aislar térmicamente el volumen de tratamiento.

En su forma más simple, la envolvente está compuesta por tres capas de materiales distintos [7]:

- La capa interna es aquella que está en contacto directo con el volumen interno del horno. Está compuesta por material refractario cuya selección depende de varios factores:
 - Temperatura operacional del horno. Los ladrillos deben ser capaces de soportar la temperatura de trabajo del sistema.
 - Sobrecalentamiento local. Dependiendo de la ubicación de los quemadores puede existir este fenómeno. En lo posible se debe evitar.
 - Acción abrasiva y/o erosiva. Debido a la naturaleza del combustible usado y los productos de combustión.
 - Esfuerzos generados por dilatación térmica. El material refractario debe tener un coeficiente de expansión térmica lo suficientemente bajo para no generar grietas durante la operación.

- La capa intermedia debe ser un aislante térmico que permita reducir la transferencia de calor por conducción desde la capa interna hacia la capa externa, por lo que debe tener una alta resistividad térmica.
- La capa externa tiene como objetivo el sellado atmosférico del horno, además de proveer integridad estructural. Comúnmente se emplean láminas de acero para esta labor.

Anteriormente se encontró de manera experimental que a medida que el espesor de la capa refractaria aumenta y disminuye el de la capa aislante el calor necesario para calentar la envolvente aumenta, por lo que es conveniente minimizar el espesor de la capa refractaria, restringiéndose a espesores de materiales disponibles en el mercado. Por esta razón, se sugiere que los ladrillos refractarios se ubiquen de tal manera que el espesor de la capa refractaria sea el menor posible. [7]

3.3. Transferencia de calor

Se describe la transferencia de calor como la energía transportada mediante la diferencia de temperatura entre cuerpos. Al existir una diferencia de temperatura entre dos cuerpos la energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, hasta que la distribución de la temperatura se torna uniforme y se alcanza un estado de equilibrio [8].

Existen tres mecanismos diferentes por los cuales se puede dar la transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

3.3.1. Conducción

El mecanismo de conducción se presenta al estar en contacto directo cuerpos con distinta temperatura. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas como resultado de la interacción entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases.

La razón de conducción es directamente proporcional al espesor del material y se puede calcular con la ley de conducción de calor de Fourier que se presenta en la ecuación 1.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde k es la conductividad del material y A es el área de transferencia de calor perpendicular a la dirección de transferencia y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

3.3.2. Convección

El mecanismo de transferencia de calor por convección se presenta cuando existe movimiento relativo entre partículas con diferente temperatura. En este mecanismo el flujo de calor se da entre un fluido y la superficie de un elemento por la conducción a través de una fina capa del

fluido que está en contacto con la superficie del material. La convección puede ocurrir de forma natural o forzada dependiendo de las condiciones de movimiento de las superficies en contacto.

En la convección natural el movimiento del fluido se presenta por la diferencia de densidad que existe entre las capas de fluido de distinta temperatura, las zonas más densas y frías se desplazan hacia abajo mientras que las zonas calientes y menos densas se desplazan hacia arriba.

Por otro lado, la convección forzada se define cuando el movimiento del fluido es ocasionado por una fuente externa, como una bomba, el viento o un ventilador.

La ley de enfriamiento de Newton, presentada en la ecuación 2, permite determinar la tasa de conducción de calor por convección. [9]

$$\dot{Q}_{conv} = A_s h (T_s - T) \quad (2)$$

Donde

h =coeficiente de transferencia de calor por convección

A_s =Área por la que se da la transferencia de calor por convección

T_s =Temperatura de la superficie

T = Temperatura del fluido.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección es necesario recurrir al número de Nusselt, que se define como muestra la ecuación 3.

$$Nu = 0.6 * (Gr * Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Donde

Gr =Número de Grashof (Adimensional)

Pr =Número de Prandtl (Adimensional)

La ecuación 3 corresponde a la correlación empírica del número promedio de Nusselt para un número de Rayleigh $104 \leq Ra \leq 109$, donde el número de Rayleigh es el producto del número de Prandtl y el número de Grashof [9].

El número de Nusselt da cuenta de la relación existente entre las tasas de transferencia de calor por conducción y por convección. El número de Nusselt involucra el número de Grashof (Gr), el número de Prandtl (Pr). El número de Prandtl describe la relación existente entre la tasa de disipación de la cantidad de movimiento y la tasa de disipación de cantidad de calor en un fluido. Este número se encuentra tabulado para diferentes fluidos, para el caso del aire el valor del número de Prandtl puede ser extraído del anexo 1.

Por su parte, el número de Grashof representa la razón entre la flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre un fluido y rige el régimen de flujo en la convección natural [9]. El número de Grashof está definido por la ecuación 4.

$$Gr = (T_s - T_\infty) * \frac{g * \beta * (\rho^2)}{v^2} * L^3 \quad (4)$$

Donde

T_∞ =Temperatura tomada suficientemente lejos de la superficie [K]

g =Aceleración de la gravedad [m/s^2]

β =coeficiente de expansión volumétrica [1/K]

ρ =Densidad del fluido [kg/m^3]

v =Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

L =Longitud característica de la configuración geométrica [m]

La longitud característica involucra tanto la longitud horizontal de la cámara como su longitud vertical. Se define por medio de la ecuación 5.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{LH} + \frac{1}{LV} \quad (5)$$

Donde:

LH =Longitud horizontal de la cámara del horno

LV =Longitud vertical de la cámara del horno

El coeficiente de expansión volumétrica representa la variación de la densidad de un fluido con la temperatura a presión constante, si se considera el fluido como un gas ideal el coeficiente de expansión volumétrica se define por medio de la ecuación 6.

$$\beta = \frac{1}{(T_s + T_\infty)/2} \quad (6)$$

3.4. Energía en un horno de tratamientos térmicos

En un horno de tratamientos térmicos la cantidad de energía útil que debe aportarse debe suplir la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del aire y la cantidad de calor que absorbe el material al realizar el tratamiento térmico.

La cantidad de calor que necesita suministrarse para calentar una sustancia i conociendo su temperatura inicial y final está definida por la ecuación 7.

$$Q_i = m * C_p * \Delta T \quad (7)$$

Donde

m =Masa de la sustancia i [kg]

C_p =Calor específico [kJ/Kg*K]

ΔT =Diferencia de temperaturas [K]

La cantidad total de calor que debe suministrar el horno para elevar la temperatura de la carga y el aire en un tiempo determinado está dada por la ecuación 8.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_A + \dot{Q}_m \quad (8)$$

Donde

\dot{Q}_A =Calor requerido para calentar el aire [kW]

\dot{Q}_m =Calor requerido para calentar la carga [kW]

3.5. Pérdidas de calor en un horno

Las pérdidas de energía en un sistema de combustión se dan principalmente por 5 causas.

- Pérdidas por las paredes. Es la energía que se transfiere a los alrededores del horno desde las paredes. Se cuantifican en función de la temperatura de las paredes y la geometría del horno.
- Pérdidas en los gases de combustión. Corresponden a la energía que los gases de combustión llevan fuera del sistema. Se pueden estimar a partir del balance de masa y de la temperatura de los gases en la chimenea.
- Pérdidas por apertura. Son la porción de la energía que se pierde cuando se abre o cierra una puerta para cargar o descargar el horno.
- Pérdidas por calor latente de vaporización del agua. El sistema invierte energía en evaporar el agua presente en los gases de combustión y en el ambiente.
- Pérdidas por combustión incompleta. Parte de la energía del combustible puede ser desperdiciada si no se realiza una combustión completa.

3.5.1. Pérdidas de calor por las paredes

Las pérdidas de calor a través de las paredes de un horno se pueden presentar por cualquiera de los mecanismos de transferencia de calor. Para el caso de un horno de tratamientos térmicos tienen especial relevancia los mecanismos de transferencia por conducción y convección.

Se puede considerar el horno como una estructura compuesta en la que el flujo de calor se da de manera unidimensional. En el análisis de las pérdidas de calor a través de las paredes se considera que el sistema está expuesto por un lado a un medio a alta temperatura, la cual es

constante y conocida y por el otro lado a un medio a baja temperatura constante y conocida. En la Figura 5 se presenta un sistema de paredes compuestas como el que se describe.

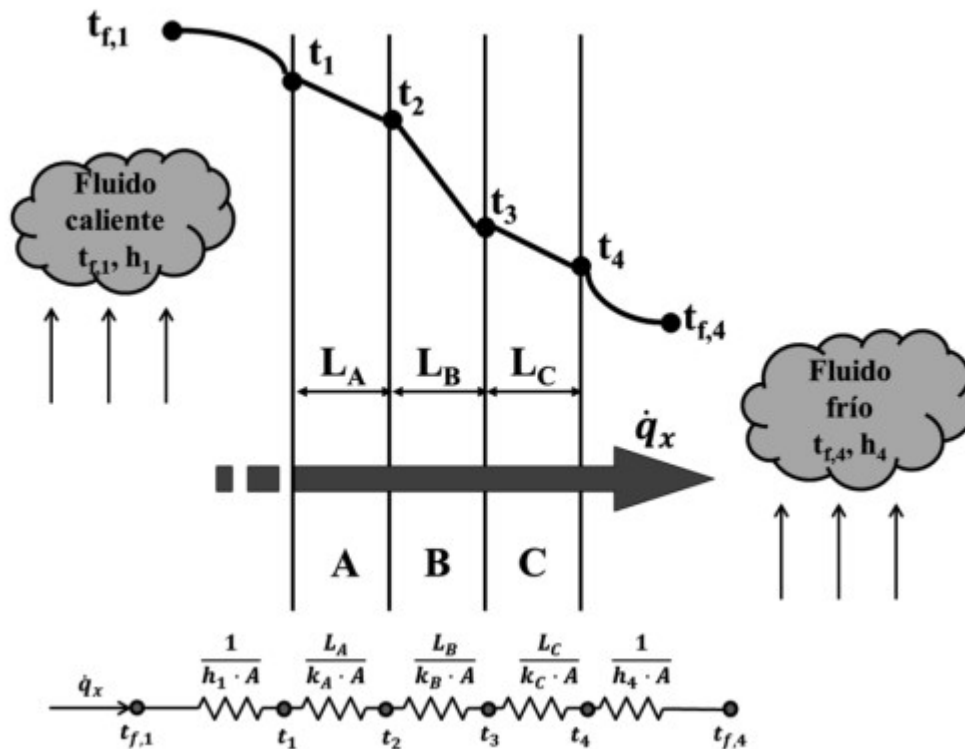


Figura 5. Sistema térmico de paredes compuestas. Tomada de [10]

En la imagen se denotan los diferentes segmentos que componen una pared del horno. De izquierda a derecha se tiene el aire caliente del interior del horno, la pared formada por ladrillo refractario, la capa de aislante, la lámina de acero y el aire del ambiente. Cada uno de los segmentos presenta condiciones diferentes de transferencia de calor. El sistema puede ser analizado usando el concepto de resistencias térmicas, en el que se busca encontrar la resistencia térmica total del sistema para llegar al calor total a través de la pared. En el caso de un horno de tratamientos térmicos se tienen en cuenta las pérdidas de energía por conducción y convección.

El sistema térmico equivalente está dado por la ecuación 9.

$$\dot{Q}_p = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_T} \quad (9)$$

Donde

\dot{Q}_p = Flujo de calor total a través de la pared [kW]

$T_{\infty,1}$ = Temperatura al interior del horno [K]

$T_{\infty,4}$ = Temperatura ambiente [K]

R_T =Resistencia térmica total [K/kW]

3.5.2. Pérdidas por calor sensible en los gases de combustión

Las pérdidas de energía en los gases de combustión tienen que ver con el volumen de humos que se producen por unidad de volumen de combustible utilizado y la temperatura a la que los mismos salen del sistema, lo cual se aprecia en la ecuación 10.

$$L_s = V_{H_H} * C_{p_v} * (T_{hh} - T_{amb}) \quad (10)$$

Donde

L_s =Pérdidas por calor sensible en los humos [kJ/m³_{st}]

V_{H_H} =Volumen de humos húmedos por unidad de volumen de combustible [m³_h/m³_{comb}]

C_{p_v} =Calor específico promedio de los humos a volumen constante [kJ/m³_{st}K]

T_{hh} =Temperatura de los humos en la chimenea [K]

T_{amb} =Temperatura ambiente [K]

3.5.3. Pérdidas por combustión incompleta

Para cuantificar la energía que se pierde por combustión incompleta es necesario conocer la proporción de compuestos en los gases de combustión que demuestran que el combustible no se está quemando completamente. En particular, se debe prestar atención a la presencia de H₂ y CO en los productos de combustión. La ecuación 11 describe la cantidad de energía perdida por la proporción de una sustancia presente en los gases de combustión por unidad de volumen de combustible.

$$L_i = V_i * PCS_i \quad (11)$$

Donde

L_i =Pérdidas de energía por unidad de volumen de combustible [kJ/m³_{st}]

V_i =Cantidad de la sustancia (CO o H₂) presente en los gases de combustión [m³_h/m³_{comb}]

PCS_i =Poder calorífico superior de la sustancia [kJ/m³_{st}]

3.5.4. Pérdidas por vaporización del agua

Las pérdidas de energía causadas por la vaporización del agua se cuantifican a través del contenido de agua presente en los gases de combustión y de la entalpía de vaporización, que es la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de volumen de agua, como se presenta en la ecuación 12.

$$L_{H_2O} = h_{fg} * H_2O \quad (12)$$

Donde

H_{fg} = Entalpía de vaporización del agua [kJ/m³_{st}]

3.6. Eficiencia del horno

La cantidad de calor total requerida por el sistema se puede expresar haciendo uso de la ecuación 13.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_p + \dot{Q}_h \quad (13)$$

La eficiencia del sistema está dada por la razón entre la energía útil proporcionada, que hace referencia a la energía necesaria para calentar la carga, y la energía total suministrada. La eficiencia del horno queda definida por la ecuación 14.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_T} \quad (14)$$

3.7. Pruebas y ensayos

Para determinar el nivel de éxito del proyecto es necesario realizar pruebas que determinen el estado de las piezas después de sufrir un proceso de corte térmico y luego del tratamiento térmico posterior al corte tanto en el estado inicial como en el estado final del proceso. Teniendo en cuenta que el objetivo del recocido es disminuir la dureza del material se definen las pruebas de dureza como parámetros de comparación.

3.7.1. Prueba de dureza Leeb

El ensayo de dureza Leeb es de tipo dinámico o de rebote en el que se indica la dureza superficial de un material a través de la medida del tiempo de rebote de un cuerpo en la superficie. El instrumento empleado para realizar la prueba consiste en un dispositivo de impacto equipado con una esfera de carburo de tungsteno o un cuerpo con punta de diamante, una bobina de inducción y un anillo de soporte. Se conecta el dispositivo a una pantalla indicadora que muestra la dureza de la superficie.

Para la realización de ensayos de dureza Leeb se deben seguir las indicaciones de la norma ASTM A956 [11] en la que se describe el proceso de medición, así como la preparación de las piezas para el ensayo y prácticas recomendadas para obtener lecturas fiables.

3.7.2. Prueba de dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell consiste en un método de ensayo por indentación en el que usa una máquina calibrada para forzar un indentador cónico esferoidal de diamante o una bola de acero endurecido o carburo de tungsteno contra la superficie del material a ser ensayado en dos operaciones para luego medir la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

En la norma ASTM E-18 se definen los lineamientos para la realización de la prueba de dureza Rockwell, así como las definiciones pertinentes. Las etapas a seguir durante un ensayo de dureza Rockwell son [12]:

- Paso 1: Aplicar una fuerza preliminar al indentador. Luego de mantener la fuerza preliminar o precarga durante un tiempo determinado medir la profundidad de indentación alcanzada.
- Incrementar la carga aplicada a una tasa controlada hasta la carga de prueba. Mantener la carga de prueba aplicada según el tiempo especificado.
- Retirar la carga de prueba hasta regresar a la precarga. Después de mantener la precarga durante el tiempo especificado se mide la profundidad de indentación final. La dureza Rockwell se deriva de la diferencia h entre las profundidades de indentación de referencia.

Existen dos tipos de ensayo de dureza Rockwell: El ensayo de dureza Rockwell y el ensayo de dureza Rockwell superficial. La diferencia entre ambos radica en la fuerza de precarga empleada en cada caso.

- En el Ensayo Rockwell la fuerza de precarga es de 10 kgf (98 N) y las cargas de prueba son de 60 kgf (589 N), 100 kgf (981N) y de 150 kgf (1471 N).
- En el ensayo de dureza Rockwell superficial la fuerza de precarga es de 3 kgf (29 N) y las cargas de prueba son de 15 kgf (147 N), 30 kgf (294 N) y de 45 kgf (441 N)

Es recomendable que la pieza a probar sea preparada de forma que la superficie de prueba y la de la cara contraria a esta estén lisas y libres de óxidos, materiales extraños y lubricantes. En algunos casos, cuando el material de la pieza a probar puede adherirse al indentador se recomienda el uso de un lubricante adecuado como el keroseno.

La preparación de la pieza se debe llevar a cabo de forma que cualquier alteración de la dureza superficial de la pieza debido al calor o al trabajo en frío sea minimizada.

3.8. Sistema de control

El control en un sistema es el mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla [13]. El control puede ser de lazo abierto o de lazo cerrado. Un control de lazo abierto es aquel en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada, por tanto, estos sistemas deben ser calibrados hasta obtener una relación entre la entrada y la salida que permita conseguir el comportamiento deseado.

Por otra parte, en un control de lazo cerrado la señal de salida influye sobre la señal de entrada, esto se hace midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado y utilizando la diferencia entre ambos para realizar una acción que busque reducir la diferencia. El control automático entonces exige un lazo cerrado de interacciones sin intervención humana [13]. En la Figura 6 se presenta el esquema de un lazo de control cerrado.

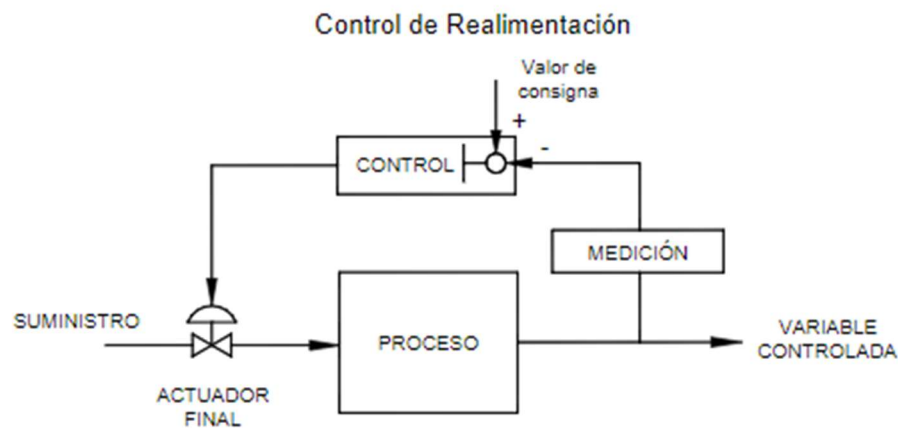


Figura 6. Esquema de un lazo de control cerrado. Tomada de [13]

Los elementos que componen un lazo de control son:

- **Elemento de medición:** Se encarga de medir la variable a controlar y envía señales correspondientes al valor medido al controlador.
- **Controlador:** Es el encargado de ejecutar acciones que acerquen el valor de la variable al valor deseado. Recibe las señales del elemento de medición y envía señales al elemento final de control.

- **Actuador o elemento final de control:** Es el que regula el suministro de energía o de materia al sistema. Su acción cambia el estado de la variable controlada.

La medición depende de la variable de interés en cada sistema específico. En la industria es común que se quiera monitorear y controlar variables como la presión, la temperatura o el flujo de gases y líquidos. En particular, para un proceso de tratamiento térmico es de interés el control de la temperatura, así como de la velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia de las piezas a alta temperatura.

Es deseable que el sistema de control sea de fácil acceso para que el personal encargado de la programación del horno pueda seleccionar una curva de tratamiento térmico adecuada según la carga que se vaya a procesar, buscando que se obtengan los resultados esperados al momento de realizar los tratamientos térmicos al acero.

Actualmente existen múltiples opciones que permiten implementar el control automático de la temperatura en procesos industriales. Se describen algunas de ellas.

Controladores lógicos programables

Conocidos como PLC por sus siglas en inglés son dispositivos diseñados para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real, siendo muy común su uso en ambientes industriales por la robustez con que son construidos.

La amplia gama de PLC's disponibles permite escoger entre múltiples opciones dependiendo de las características del proceso que se desea automatizar. Para seleccionar un PLC se deben tener en cuenta principalmente el tipo de variables, sensores y actuadores que se van a necesitar en el proyecto, además de conocer las facilidades de programación que ofrece cada fabricante.

Se suele utilizar este elemento en equipos para la fabricación de plástico, en máquinas de embalaje y en general en aquellas máquinas que requieren el control de un proceso de manera secuencial.

Microcontroladores

Son básicamente circuitos integrados programables capaces de ejecutar órdenes almacenadas en su memoria. Están compuestos por varios bloques funcionales que cumplen tareas específicas, algunos de ellos son:

- Memoria ROM (Solo lectura)

- Memoria RAM (Acceso aleatorio)
- Líneas de entradas y salidas (Puertos de conexión)
- Lógica de control (Coordina la interacción entre los demás bloques)

Algunas funciones especiales que pueden ser ejecutadas usando microcontroladores son

Conversión análoga a digital (A/D): Permite leer señales analógicas como temperatura, voltaje y luminosidad.

Temporización programable: Pueden contabilizar tiempos entre eventos, generar temporizaciones o salidas con frecuencia específica.

Comunicación serial: Pueden establecer comunicación con otros dispositivos.

Memoria EEPROM: Es un tipo de memoria que permite el guardado de los datos aunque sea desconectada la alimentación eléctrica.

Los microcontroladores son equipos versátiles con grandes prestaciones, lo que permite un mayor control sobre los elementos involucrados en un proceso, adicionalmente al ser elementos sencillos requieren de poco mantenimiento y su uso disminuye el riesgo de averías y ajustes, son dispositivos que ocupan espacios pequeños y su costo es reducido.

Al momento de seleccionar un microcontrolador se deben considerar aspectos como la experiencia previa, la documentación disponible, las herramientas de desarrollo necesarias, la disponibilidad del microcontrolador en el mercado, además de las entradas y salidas disponibles, el consumo de recursos y la cantidad de memoria necesaria.

Es posible encontrar en el mercado microcontroladores embebidos en circuitos integrados que incluyen entre otras cosas reguladores de voltaje, indicadores y facilidades de conexión. A estas soluciones se les conoce como placas de desarrollo. En ocasiones puede considerarse el uso de estos dispositivos con el fin de facilitar la instalación y puesta en marcha de un equipo.

Computadores industriales

Son equipos robustos diseñados para soportar ambientes hostiles. Tienen una gran capacidad de expansión, flexibilidad y fiabilidad, sumado a la alta calidad que es esperada de un equipo industrial.

Los computadores industriales presentan solidez mecánica y eléctrica, son modulares para permitir la integración de tarjetas con Entradas/Salidas y conectores, permiten el uso de software específico para el proceso controlado y están protegidos contra ambientes industriales en aspectos como el ruido electromagnético, polvo y temperaturas extremas.

Los PC industriales suelen ser utilizados como complemento de los PLC o los microcontroladores para facilitar la interacción del operario con la máquina y para realizar tareas de almacenamiento y gestión de datos o monitorización.

3.9. Tipos de control

3.10. Control On/Off

Se emplea en procesos en los que la demanda es intermitente y la aplicación es simple. El ajuste de este tipo de sistemas se hace a través de la histéresis. La histéresis se configura de forma que la salida no conmute rápidamente entre el estado alto (on) y el estado bajo (off), si la histéresis se encuentra seteada en un rango muy estrecho el cambio rápido en el estado de la salida puede ocasionar un deterioro acelerado de elementos mecánicos como los relés y contactos. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que a mayor histéresis mayor es la inercia del sistema. La aplicación de un sistema On/Off resulta en una oscilación de las variables. La Figura 7 muestra el comportamiento de un actuador y de la señal al emplear un control On/Off [3].

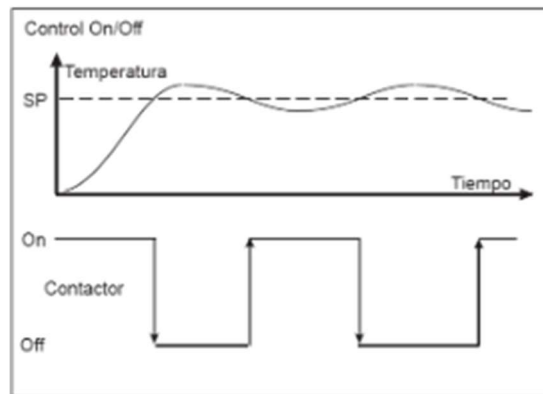


Figura 7. Respuesta en el tiempo de un control On/Off. Tomada de: [3]

3.11. Control PID

El control proporcional integral derivativo (PID) es un mecanismo de control por realimentación que se emplea en control de procesos industriales. Éste corrige el error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener calculándolo y realizando una acción de corrección que se pueda ajustar al proceso. Este tipo de control se emplea donde se requiere linealidad de la respuesta con errores pequeños, obteniendo procesos estables. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la señal de respuesta en el tiempo en un control PID.

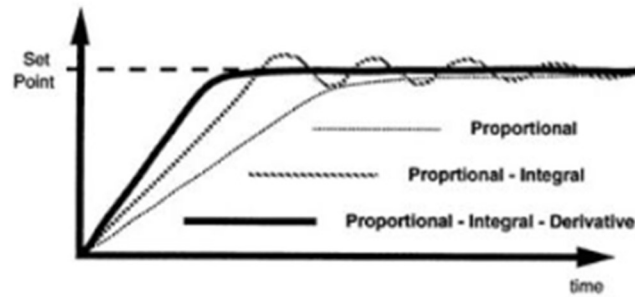


Figura 8. Respuesta en el tiempo de un controlador PID. Tomada de:[3]

En general, la respuesta de un controlador PID está definida por la ecuación 1.[14]

$$U(k) = k_p e(k) + k_i \sum e(k) + k_d [e(k) - e(k - 1)]$$

Donde:

K_p : Constante proporcional

K_i : Constante integral

k_p : Constante derivativa

$e(k)$: Error actual

$e(k-1)$: Error anterior

$U(k)$: Respuesta actual

3.12. Control difuso

Los sistemas de calentamiento en los hornos presentan desventajas de no linealidad, variaciones en el tiempo y amplios retardos, por lo que en ocasiones el control realizado por métodos convencionales no resulta satisfactorio [14]. Durante los últimos años se han venido implementando sistemas de control difuso en hornos industriales, obteniendo muy buenos resultados[14][15].

Mientras en la lógica tradicional se utilizan sentencias booleanas para evaluar la pertenencia o no de un elemento a un conjunto, en la lógica difusa se parte de que las sentencias no son absolutamente verdaderas o falsas, por lo que se trabaja con grados de pertenencia o no pertenencia a un set difuso o un conjunto de sets difusos [16]. De esta forma, cada valor medido de la variable puede pertenecer en diferentes proporciones a distintos sets o conjuntos difusos.

Por ejemplo, si se dice que una persona que mida más de 1,8m de altura es alta, ¿Se podría decir que una persona que mida 1,79999 m es baja? El sentido común nos dice que no, pero no

sería 100% verdadero decir que es una persona alta. Para la lógica booleana la respuesta es no, mientras que en la lógica difusa la respuesta dependería del porcentaje de pertenencia de la estatura a los conjuntos que definen las personas bajas o altas [17].

El control difuso consiste en la adopción de parámetros heurísticos para realizar las acciones de control sobre la variable de interés. Esta información puede provenir de personas expertas en el proceso, que conozcan parámetros que den buenos resultados sobre el control de la variable, o de simulaciones matemáticas del proceso que permiten analizar el comportamiento de las variables y desarrollar algoritmos de control para el proceso en particular. La información es cargada en el controlador difuso para ayudar a las acciones de este, que emula la toma de decisiones como las hacen las personas.[18]

Para desarrollar un sistema de control difuso es necesario seguir una serie de pasos que permiten manipular las variables del proceso para obtener la salida deseada.

1. **Leer variables de entrada.** Se cuantifica el nivel de la variable a controlar. Este es un valor exacto, por ejemplo: Velocidad.
2. **Establecer conjuntos difusos.** Se deben establecer conjuntos para evaluar el nivel de pertenencia de la señal leída a cada uno de ellos. En un sistema de control de velocidad podrían ser rápido, normal y lento.
3. **Fuzzificación.** Se calcula el nivel de pertenencia de la variable a los diferentes conjuntos difusos.
4. **Controlador difuso.** Con el nivel de pertenencia calculado se obtiene el nivel de la salida necesario. Para el sistema de control de velocidad se obtendría el porcentaje de aceleración necesario para obtener la salida deseada.
5. **Defuzzificación.** Se transforma la señal del controlador difuso a una señal exacta entendible por los actuadores del sistema.

4. Valoración inicial

4.1. Valoración cualitativa

El reconocimiento de las condiciones iniciales del proceso de recocido dentro de la empresa juega un importante papel como punto de comparación en el momento en el que se implementen actualizaciones o mejoras. Por ese motivo se realiza un registro del estado de los componentes del horno y las condiciones de las piezas que se tratan térmicamente en él.

En este análisis se tienen en cuenta las dimensiones del horno, los ciclos de trabajo, la capacidad de los hornos y la calidad del recocido. Adicionalmente, se estima el costo de operación y reposición del horno pequeño.

La Figura 9 presenta la fotografía exterior del horno HR2 (horno pequeño) tal y como se encontró en la empresa. La primera característica a resaltar es que el quemador se encuentra en la parte inferior trasera del horno, lo que disminuye el área útil del horno al tener que dejar un espacio que permita la circulación de los gases calientes. En general la estructura metálica que conforma el exterior del horno está en buen estado, aunque los ladrillos refractarios en el interior presentan fisuras y golpes, relacionados posiblemente con el cargue y descargue de material. Dentro del horno se encuentra una parrilla de acero sobre la cual se ubican las piezas a tratar térmicamente.



Figura 9. Estado inicial del horno. Elaboración propia.

La Figura 10 muestra en detalle la sección inferior trasera del horno, donde se ubica el quemador. Se aprecia que hay una canal por la que entra la llama. Sobre esta canal se evita ubicar piezas para el tratamiento térmico para garantizar el flujo de gases y evitar que las piezas salgan quemadas o descarburadas. Se ve además que alrededor de la canal se ubican ladrillos refractarios en posición vertical, disposición que aumenta el número de ladrillos utilizados y por ende la energía necesaria para el proceso.



Figura 10. Interior del horno de recocido HR2, ubicación del quemador. Elaboración propia.

La Figura 11 presenta el detalle de la puerta del horno. La puerta está formada por un exterior metálico en el que se disponen ladrillos aislantes cubiertos por un mortero refractario. Debido al desgaste del tiempo y a la apertura y cierre de la puerta se presentan fisuras en el mortero.



Figura 11. Puerta del horno. Elaboración propia.

El horno cuenta con un quemador Baltur BTG 3 operado con gas natural de la red de la ciudad de Medellín, las características técnicas generales del quemador se presentan en la Figura 12.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MODELO		BTG 3
PIN homologación		0085BQ0476
Potencia térmica máxima metano	kW	42.7
Potencia térmica mínima metano	kW	16.6
¹⁾ emisiones metano	mg/kWh	Clase 2
Funcionamiento		De una etapa
Transformador metano 50 hz		15kV - 25mA
Transformador metano 60 hz		15kV - 25mA
Caudal térmico máximo metano	Stm ³ /h	4.5
Caudal térmico mínimo metano	Stm ³ /h	1.8
Presión máxima metano	hPa (mbar)	65
Presión mínima metano	hPa (mbar)	16
Potencia térmica máxima propano	kW	42.7
Potencia térmica mínima propano	kW	16.6
Caudal térmico máximo propano	Stm ³ /h	1.7
Caudal térmico mínimo propano	Stm ³ /h	0.7
Presión máxima propano	hPa (mbar)	65
Presión mínima propano	hPa (mbar)	8
²⁾ emisiones propano	mg/kWh	Clase 2
Motor ventilador 50hz	kW	0.09
Revoluciones motor ventilador 50hz	revoluciones/min.	2800
Motor ventilador 60hz	kW	0.09
Potencia eléctrica absorbida* 50 Hz	kW	0.14
Potencia eléctrica absorbida* 60 Hz	kW	0.14
Tensión de alimentación 50 Hz		1N-50Hz-230V
Tensión de alimentación 60 Hz		1N ~ 220V ±10%
Grado de protección		IP40
Detección llama		SONDA DE IONIZACIÓN
Equipo		LME11..
Regulación del caudal de aire		MANUAL
Temperatura aire ambiente de funcionamiento	°C	-15 ÷ +40
Peso con embalaje	kg	8.6
Peso sin embalaje	kg	8.2

Figura 12. Ficha técnica del quemador Baltur BTG 3. Tomada de: [19]

El control del quemador se realiza empleando un controlador MAXTHERMO MC5438, que está incorporado en un tablero de conexiones en el que se encuentran los elementos eléctricos necesarios para el funcionamiento del sistema, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Tablero de conexiones para el control del horno. Elaboración propia.

Las Figuras 14 y 15 muestran ejemplos de cargas típicas de recocido en la empresa. Al ser Ferrocortes una empresa que realiza cortes de piezas según los requerimientos de los clientes se obtienen piezas de diversas geometrías que requieren ser recocidas y son distribuidas en el espacio disponible en el horno.



Figura 14. Ejemplo 1 de carga en horno de recocido. Elaboración propia.



Figura 15. Ejemplo 2 de carga de recocido. Elaboración propia.

Durante conversaciones con el personal encargado del recocido de las piezas se mencionó que, pese a que gran parte de las piezas caben dentro del horno pequeño, lo más habitual es que sean recocidas en el horno grande. Esto en parte obedece a la capacidad de los hornos, pero también a la calidad del recocido que se obtiene al emplear uno u otro horno.

En la Figura 16 puede apreciarse la carga de la Figura 16 después del ciclo de recocido, llevado a cabo en el horno grande.



Figura 16. Carga de la Figura 16 después del recocido. Elaboración propia.

Como puede observarse, las piezas presentan mayor oxidación en una región, que corresponde a la región de los cuerpos que está más expuesta a la llama durante el tratamiento. Este fenómeno se presenta en los dos hornos.

Dimensiones generales

Se levantaron las dimensiones del horno para establecer las condiciones iniciales. Las dimensiones generales del horno pequeño se presentan en la Figura 17.

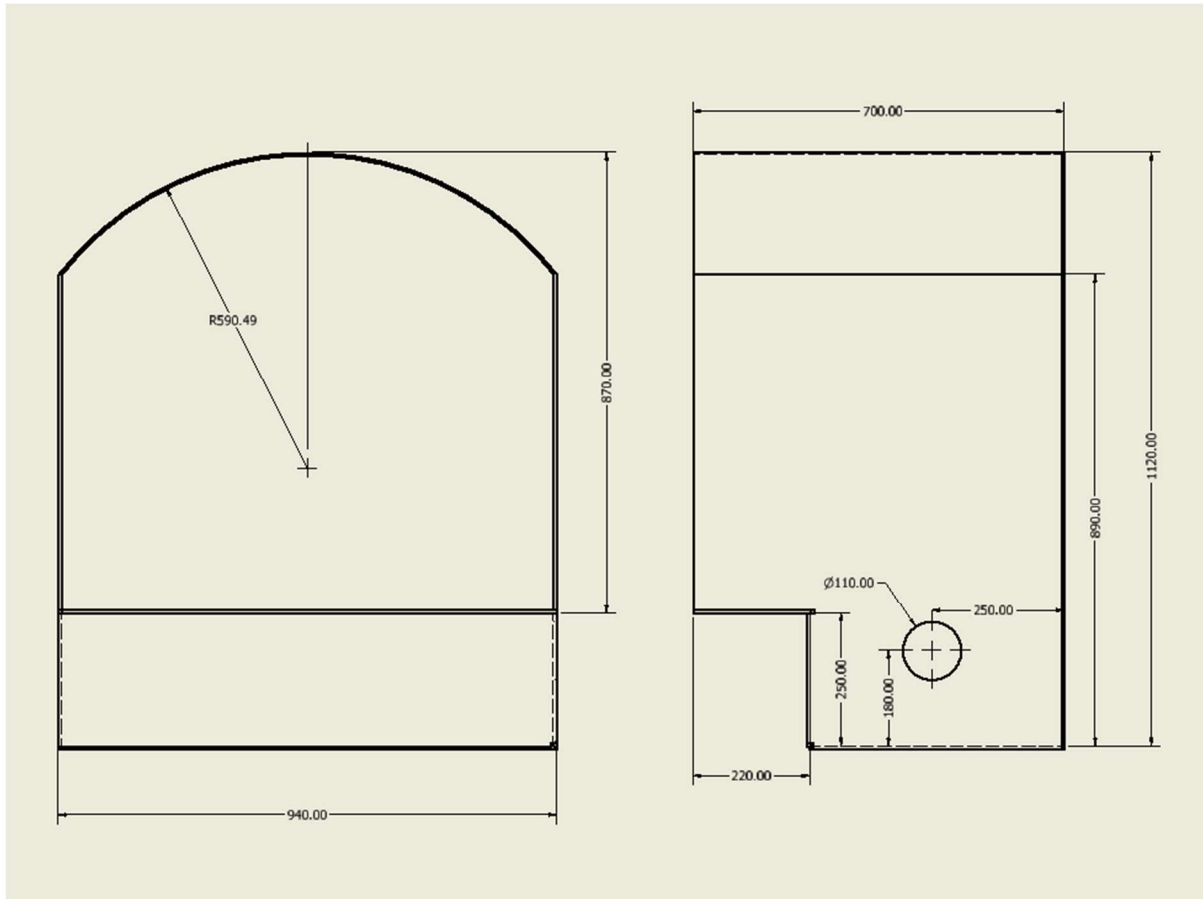


Figura 17. Dimensiones generales del horno pequeño en el estado inicial. Elaboración propia.

4.2. Valoración cuantitativa

Se elaboró un programa en Python para analizar los datos disponibles acerca del recocido en la empresa para el año 2021, almacenados originalmente en el software EPICOR que es el programa de planeación de recursos empresariales (ERP por las siglas en inglés de Enterprise Resource Planning) utilizado por la empresa. El software almacena los datos correspondientes a los reportes de cada operación realizada en la empresa, por lo que es necesario filtrar solo la información de interés, en este caso la de los hornos. En la Figura 18 se muestran los resultados del análisis de los 115 procesos de recocido que se realizaron durante ese año. Se evidenció que el 79,2% de los procesos de recocido fueron realizados en el horno grande y que, en términos másicos, el horno grande procesó el 96% de los kilogramos.

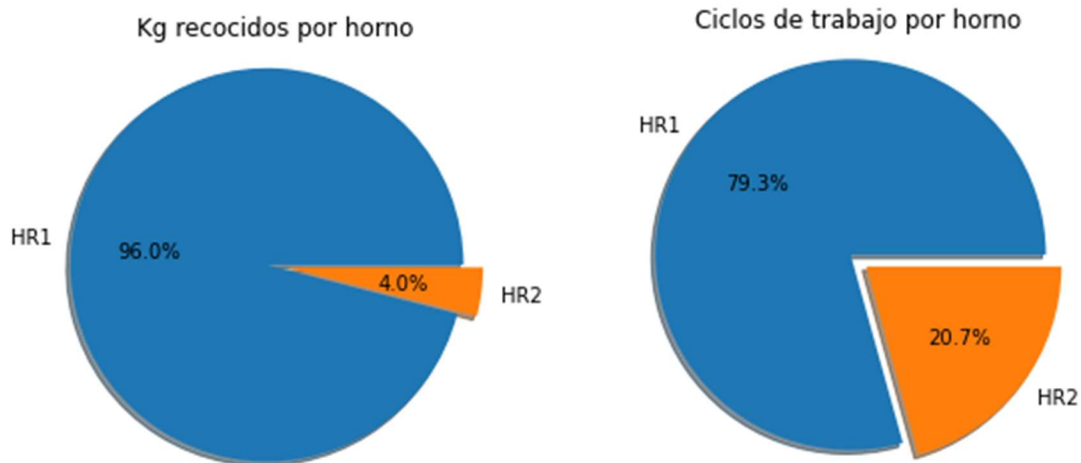


Figura 18. Comparativo de uso de los hornos. Elaboración propia.

Para comprender las razones por las que se suele utilizar el horno grande en la mayoría de las veces es necesario analizar diferentes factores que en la empresa se tienen en cuenta para decidir que horno usar. Los principales factores que afectan esta decisión son:

- **Dimensiones de las piezas:** Teniendo en cuenta que el horno pequeño en el ancho tiene una dimensión de 700 mm se define que cuando al menos una pieza de la carga a recocer en el día supere en una de sus longitudes este valor toda la carga debe recocerse en el horno grande, que tiene como área útil un cuadrado de 1200 mm de lado.
- **Masa total de la carga a recocer:** La experiencia ha demostrado que al introducir cargas de más de 350 kg al horno pequeño la carga se recoce parcialmente, dando lugar a reprocesos que pueden reducir la rentabilidad de los pedidos e incluso generar pérdidas. Cuando la carga total del día excede los 350 kg se toma la decisión de realizar el recocido en el horno grande, que tiene una capacidad real, dada por la experiencia, de 1700 kg aproximadamente.
- **Espesor de las piezas:** Cuando las piezas son de espesores considerables (mayores a 90 mm) suelen recocerse en el horno grande, pues la experiencia ha mostrado que este tipo de piezas no alcanzan un recocido uniforme dentro del horno pequeño, quedando blandas en la superficie que está cerca de la llama y duras en la superficie del lado contrario. A pesar de que este fenómeno también se ha presentado en el horno grande, los efectos son menos significativos.

- **Factor confianza:** Debido a la experiencia que ha tenido la empresa al realizar recocidos se toman decisiones empíricas a la hora de realizar el tratamiento. Dado que el horno grande ha presentado mejores resultados a lo largo del tiempo se ha centrado la atención en su uso.

Considerando el tamaño de las piezas como un primer parámetro de filtrado de los datos se obtuvo el resultado que se presenta en la Figura 19. En este sentido, el 43% de las veces que se empleó el horno grande había al menos una pieza que superaba las dimensiones para ser recocida en el horno pequeño.

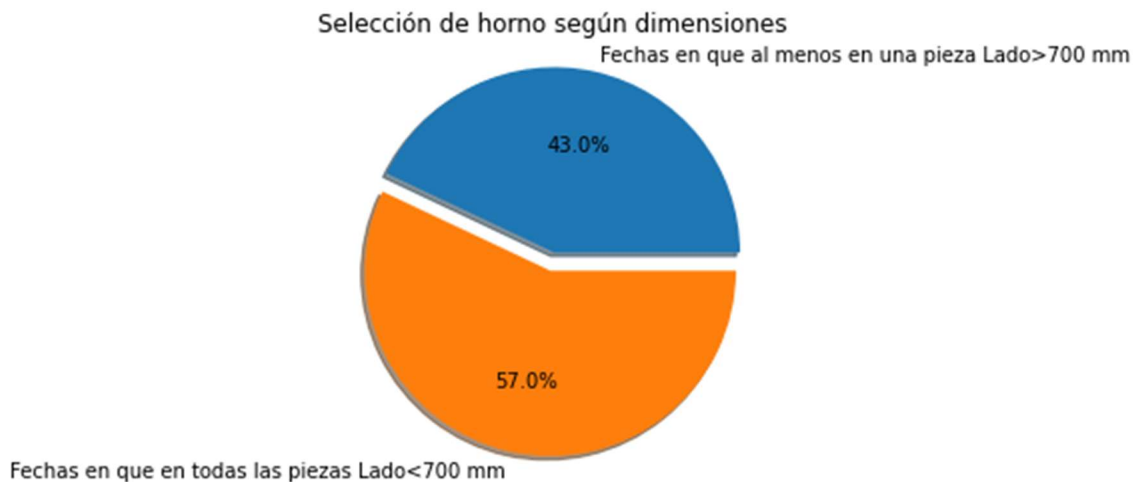


Figura 19. Selección de horno según dimensiones. Elaboración propia.

Analizando la situación desde el punto de vista de la masa total de cada carga se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 20. En estas condiciones es posible notar que el 71.3% de las veces que se usó el horno grande la carga superó los 350 kg. Aun así, se tuvo un potencial de utilización del horno pequeño de un 28,7%.

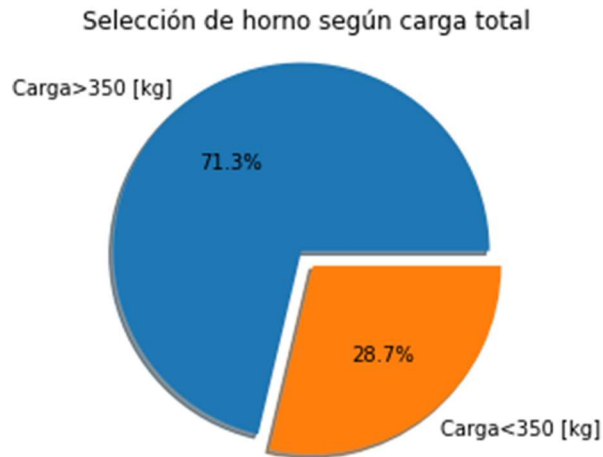


Figura 20. Selección de horno según carga total. Elaboración propia.

Al analizar las consideraciones dimensionales y de carga como efectos combinados se obtuvo el resultado que se presenta en la Figura 21. Se puede ver que el resultado es similar al obtenido al considerar solo el factor carga como criterio de selección, por lo que se presta mayor atención en este sentido.

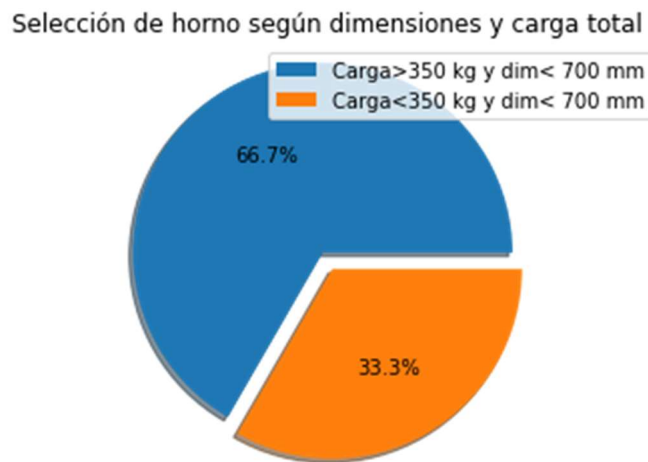


Figura 21. Selección de horno según dimensiones y carga total. Elaboración propia.

Se calculó el valor de reposición del horno teniendo en cuenta que el horno fue construido con láminas de 6 mm de espesor de acero ASTM A36 y los soportes se tomaron como perfiles en C de $4x\frac{1}{2}$ ". Se consideró el material disponible en la empresa y el precio se calculó de acuerdo con los costos de estos en la compañía.

Con las dimensiones de las paredes del horno y conociendo la medida comercial de los ladrillos refractarios (115x230x65 mm) es posible calcular el número total de ladrillos necesario

para recubrir el interior del horno. Teniendo el número de ladrillos y conociendo un precio estimado de los mismos se puede estimar el valor del total de ladrillos.

De los elementos comerciales como el quemador y el control se tomó el valor de referencia de empresas que los ofrecen en línea. La Tabla 1 presenta el valor estimado de reposición del equipo considerando únicamente los materiales necesarios.

Tabla 1. Costos de reposición del Horno.

Descripción	Valor
Láminas	\$ 961.627,32
Perfiles	\$ 219.066,80
Refractarios	\$ 1.173.911,20
Quemador	\$ 4.800.000,00
Control	\$ 260.000,00
Total	\$ 7.414.605,32
Imprevistos	\$ 741.460,53
Gran Total	\$ 8.156.065,86

A partir de este valor se puede considerar la viabilidad económica de realizar mejoras en el horno frente a la posibilidad de adquirir uno nuevo.

4.2.1. Costo de operación

Además de conocer el costo de reposición del horno para sentar una base, es necesario conocer el costo de operación del mismo, para lo cual deben tenerse en cuenta diferentes factores que están involucrados.

Consumos:

Los hornos instalados en la empresa operan usando gas natural de red como combustible. Siendo los únicos equipos que utilizan la red de gas en la empresa resultó sencillo calcular el consumo de gas por ciclo del horno al monitorear el contador de gas antes y después de cada ciclo de tratamiento.

El consumo de gas del horno pequeño era en promedio de 7 m³ por ciclo, mientras que el consumo del horno grande era en promedio de 40.6 m³ por ciclo.

El consumo eléctrico se determinó midiendo la corriente en el circuito durante el funcionamiento. Se obtuvo que el horno pequeño consume 0.55 A a 220V, lo que equivale a un consumo de 121W.

El equipo ocupa un espacio físico dentro de la empresa, por lo que debe tenerse en cuenta el valor del arrendamiento del área en que se ubica. El horno tenía un área de 0,658 m².

En la Tabla 2 se presenta el cálculo de los costos de operación por ciclo del horno antes de la intervención.

Tabla 2. Costos de operación del horno antes de la intervención.

Fuente	Valor medido	unidad	Duración ciclo [h]	Costo [\$/ciclo]
Gas	4411,875	\$/h	3	\$ 13.235,62
Electricidad	69,67906	\$/h	3	\$ 209,04
Arriendo	20,34725	\$/h	3	\$ 61,04
Horas potencialmente productivas	485,48	\$/h	3	\$ 1.456,44
Total				\$ 14.962,14

4.3. Diagnóstico del proceso de recocido

Con el fin de diagnosticar el estado del proceso de recocido en el estado inicial del horno se llevó a cabo una prueba en la que probetas de espesores representativos de la producción de la empresa fueron sometidas al tratamiento térmico que se llevaba a cabo en la compañía.

Durante la prueba se hizo seguimiento de la temperatura de las paredes exteriores del horno, así como de la temperatura interior del horno. La temperatura exterior del horno se midió empleando un termómetro infrarrojo disponible en la empresa y la temperatura interior se midió a través de la termocupla tipo K conectada al controlador Maxthermo MC-5438 con el que se llevaba a cabo el control del quemador.

A falta de un dispositivo registrador de la temperatura del proceso se llevó un registro manual en diferentes momentos para comparar las mediciones interna y externa y cuantificar las pérdidas a través de las paredes del horno. El registro de las mediciones se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Medición de temperatura en prueba de recocido.

Tiempo transcurrido [h:mm]	Temperatura paredes exteriores [°C]				Temperatura interior [°C]
	Izquierda	Derecha	Puerta	Fondo	
0:49	22,7	32,6	32,5	26,2	220
1:12	30,7	37,7	39,5	30,3	369,2
1:34	32	39,5	45,3	34,5	467,1
2:24	43,5	54,1	64,1	52,6	572

3:09	55,2	64,1	78,1	73,8	645
------	------	------	------	------	-----

En la Figura 22 se puede apreciar como evolucionaba la temperatura en el tiempo en el horno. Se aprecia como la pendiente de la gráfica se hace menor con el tiempo, lo que demuestra que el horno no sigue un comportamiento lineal y que conforme pasa el tiempo se hace más difícil elevar la temperatura al interior del horno.

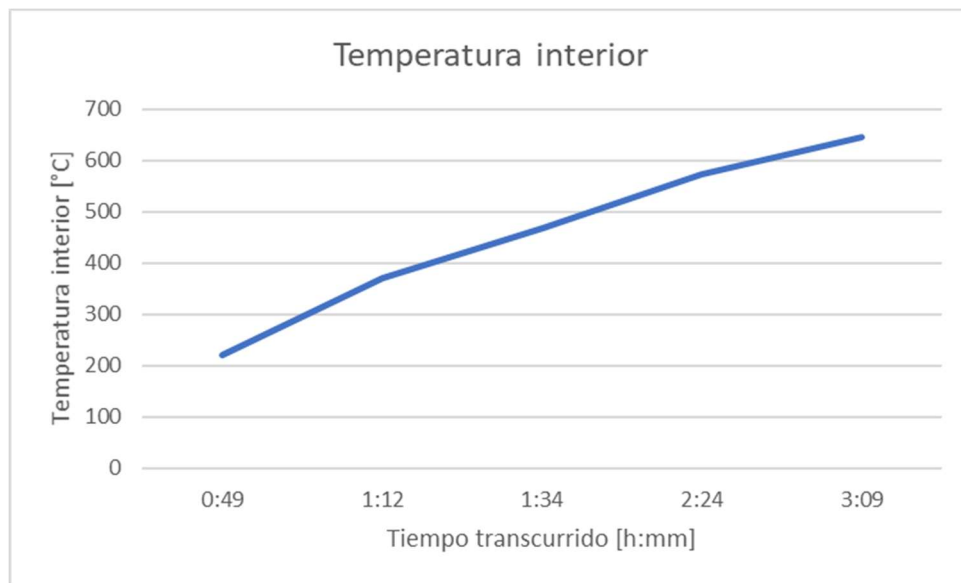


Figura 22. Evolución de la temperatura interior en prueba de recocido. Elaboración propia.

El tiempo estimado de la prueba era de cuatro horas, según información del personal este era el tiempo programado para el ciclo de tratamiento del horno pequeño, el cual debía alcanzar una temperatura de 800°C y mantenerse en ese estado durante una hora para realizar el tratamiento de recocido. Sin embargo, al momento de la prueba se evidenció que la duración del ciclo era de tres horas y media, y que el sistema no alcanzó la temperatura deseada ni se llevó a cabo el sostenimiento. Lo que demuestra desconocimiento del proceso por parte del personal.

Al corroborar la programación del controlador se encontró que en efecto el sistema estaba programado para ciclos de tres horas y media, con una temperatura de proceso configurada en 800°C. Luego de la prueba se determinó que el sistema de control necesitaba ser intervenido en busca de garantizar las condiciones necesarias para un recocido de calidad.

4.4. Eficiencia del proceso

Con el fin de diagnosticar la eficiencia del proceso en el estado inicial se desarrolló un programa en Python que integra las ecuaciones descritas en la sección 3. Para los cálculos se tomó

la máxima temperatura registrada durante la prueba. La composición química real del gas fue consultada en la página de la Transportadora de Gas Internacional (TGI), que es la empresa encargada de distribuir el gas en la ciudad de Medellín. El punto de muestreo consultado fue el de Sebastopol. El programa sigue el procedimiento que se presenta a continuación:

1. Consulta de la composición química del gas para la fecha de la prueba.
2. Cálculo del poder calorífico del gas según su composición química.
3. Cálculo del caudal promedio estándar de gas a partir de la medida del volumen total empleado en la prueba. Este valor se consultó en el contador de gas de la empresa.
4. Cálculo de la potencia necesaria para calentar la carga.
5. Cálculo de la potencia térmica del quemador.
6. Cálculo de pérdidas por calor sensible en los humos.
7. Cálculo de pérdidas de calor a los alrededores a través de las paredes del horno.
8. Creación de gráfica con los resultados.

Como resultado se obtuvo el diagrama Sankey del sistema, en el que se presenta la proporción entre la energía que ingresa al sistema y algunas de las fuentes de pérdidas energéticas. Del diagrama presentado en la Figura 23 se destaca que la eficiencia inicial del sistema es del 19,17%.

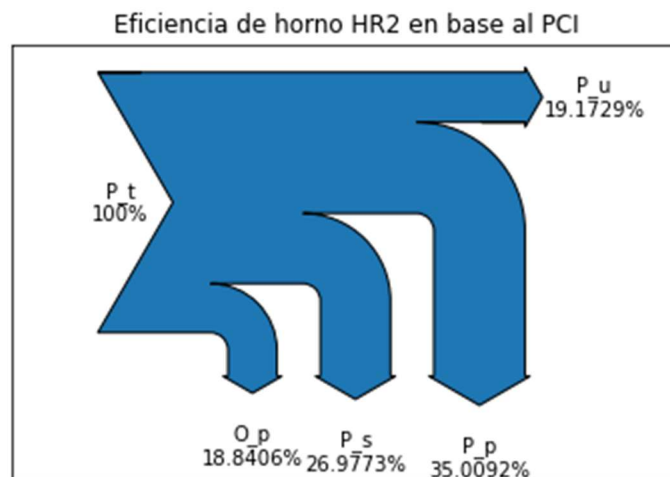


Figura 23. Diagrama Sankey del sistema. Elaboración propia.

Donde:

P_u: Potencia útil del sistema

P_p: Pérdidas de calor por las paredes del horno.

P_s: Pérdidas por calor sensible en los humos.

O_p: Pérdidas no cuantificadas.

P_t: Potencia total suministrada al sistema.

4.5. Condiciones de las piezas al entrar y salir del horno

El ensayo consistió en tomar la dureza de las piezas en dos momentos o estados. El primer estado se define cuando las piezas han sido cortadas por el proceso de oxicrote, mientras que el segundo estado se determina cuando las piezas han pasado por el proceso de recocido.

Los procesos de corte térmico afectan las piezas en las caras que estuvieron sometidas al calor. En algunos casos las piezas son retiradas de la mesa de corte inmediatamente después de finalizar este proceso y en otros casos las piezas permanecen un tiempo en el sitio antes de ser reubicadas. Según las condiciones en las que se realiza el corte de las piezas y el tiempo que permanecen en la mesa de corte la afectación térmica de las piezas puede ser mayor o menor.

Las piezas que se retiran rápidamente de la mesa de corte pueden presentar una afectación térmica mayor al presentarse en la superficie de corte un choque térmico con el aire circundante. Por su parte, las piezas que permanecen por más tiempo en la mesa de corte se enfrían lentamente, permitiendo que la microestructura del material en la zona de corte se afecte en menor medida. Se presentan en la Tabla 4 las mediciones de dureza realizadas a las piezas en el estado de corte, en adelante el estado 0, y el estado de recocido en las condiciones iniciales del horno, en adelante el estado 1.

Tabla 4. Prueba de dureza antes de la intervención

Registro pruebas de dureza										
No. Probeta	Espesor [mm]	No. Prueba	Estado	Cara del corte			Cara sin afectación			Unidades Dureza
				Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	
1	25	N.A	0	235	240	240	143	145	149	HB
2	25	0	1	229	223	217	147	150	145	
3	50	N.A	0	240	229	223	160	155	150	
4	50	0	1	197	197	197	192	197	192	
5	90	N.A	0	400	405	401	205	210	207	
6	90	0	1	320	325	328	200	195	203	

Se aprecia como las piezas de espesores relativamente bajos alcanzan niveles de dureza aceptables de acuerdo con el estado de suministro de las planchas de AISI/SAE 1045 (Entre 180 y 230 HB). Sin embargo, las piezas de espesores grandes no presentan un cambio significativo en la dureza, y quedan por fuera del rango aceptable. Esto puede presentarse debido a un tiempo de permanencia o temperatura insuficientes.

5. Control del horno

En el estado inicial los dos hornos contaban con controladores Maxthermo 5438, los cuales ofrecen la posibilidad de controlar sistemas mediante PID y On/Off mediante curvas programadas en las que se fija un valor deseado inicial y final para hasta 8 segmentos, así como un tiempo de sostenimiento para cada uno.

Durante pruebas realizadas en los dos hornos se evidenció que las curvas programadas en los controladores no se cumplían, pues el controlador establece un valor deseado dinámico durante el tiempo total programado y, aunque el horno no alcanzara la temperatura deseada el proceso se daba por terminado al cumplirse el tiempo establecido.

Adicionalmente, se encontró que el control del sistema se hacía a través del método de control On/Off, lo que generaba grandes oscilaciones alrededor del valor deseado, permitiendo sobreimpulsos y subimpulsos.

Lo observado suponía un reto para la compañía debido a que es imposible determinar con certeza la cantidad de material que se va a recocer para programar el tiempo de tratamiento adecuado para cada carga, además del complejo proceso que supone realizar la programación del controlador al contar únicamente con una interfaz de usuario limitada a dos pantallas LCD y cuatro botones.

6. Propuestas de mejora

Teniendo en cuenta el estado inicial del horno y con miras a aumentar la utilización del horno pequeño se plantearon diferentes alternativas de actualización tecnológica que permitieran mejorar la calidad del recocido y las condiciones de operación.

Como primera propuesta se plantea cambiar la distribución del horno de forma que el calor que ingresa al horno lo haga por debajo de las piezas en lugar de por el costado, como se hace actualmente, de esta forma, la llama del quemador no estaría en contacto directo con las piezas, reduciendo la posibilidad de descarburación de estas y facilitando el calentamiento de las piezas desde la parte inferior. La propuesta también contempla el aumento en la capacidad del horno para permitir el tratamiento de piezas más grandes, de forma que pueda ser utilizado en una mayor proporción, evitando encender el horno grande a menos de que sea estrictamente necesario. Un esquema de esta propuesta se presenta en la Figura 24. Para llevar a cabo esta propuesta se debe reubicar el quemador y construir la estructura faltante para lograr las dimensiones de 940 mm x 1000 mm en la base del horno.

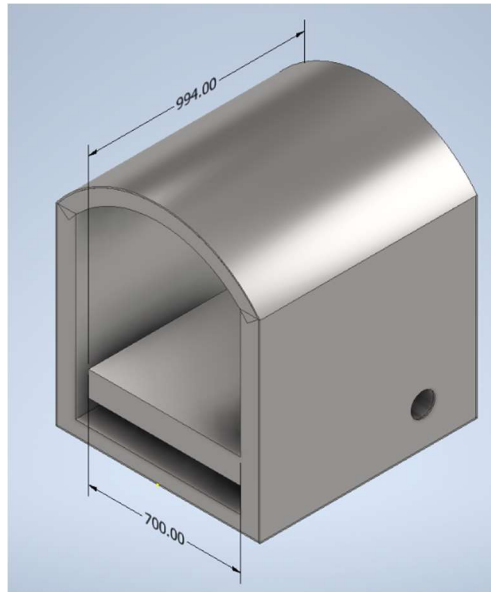


Figura 24. Alternativa de mejora 1. Elaboración propia.

Como segunda opción se plantea aislar la cámara de combustión de la cámara de recocido al implementar un sistema de horno de paredes radiantes como el que se presenta en la Figura 25. Al emplear este sistema disminuiría el riesgo de oxidación y descarburación de las piezas, además de aumentar la homogeneidad de la temperatura dentro del horno. Llevar a cabo esta propuesta implica la construcción de las paredes radiantes, con una disminución del área útil al interior del horno.

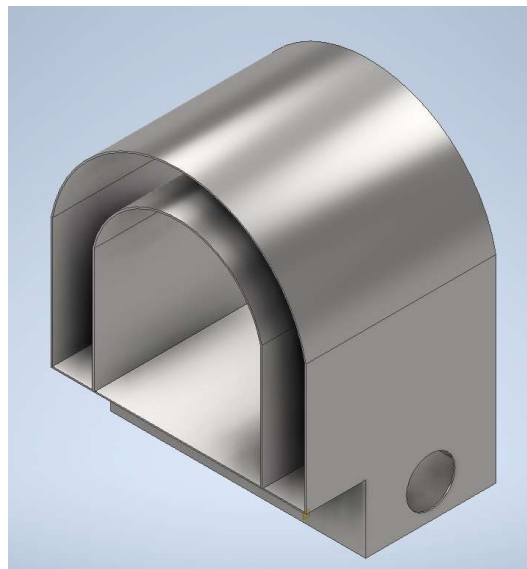


Figura 25. Alternativa de mejora 2. Elaboración propia.

En ambos casos, se propuso implementar un control basado en el microcontrolador ESP32, que puede ser programado según la necesidad para permitir entre otras cosas, monitorear la temperatura del horno de manera remota a través de comunicación WiFi y programar el ciclo de tratamiento de acuerdo con las condiciones requeridas a través de una interfaz web sencilla para el usuario.

7. Selección de alternativa

Se analizaron las alternativas propuestas en conjunto con personal de la empresa. Teniendo en cuenta la complejidad, prestaciones, costos y tiempos de fabricación se seleccionó la alternativa de mejora 1 como la más apropiada para la compañía.

A partir de esta selección se llevó a cabo el diseño en detalle de las piezas a fabricar para realizar las mejoras estructurales del horno, teniendo en cuenta los espesores de lámina disponibles para la fabricación en el inventario de la empresa, el costo del material y los procesos de manufactura necesarios para completar la fabricación. Con apoyo de los dibujantes de la empresa se realizó el dibujo en tres dimensiones de las piezas a fabricar y se simuló el ensamble de las mismas utilizando el software Autodesk Inventor. La Figura 26 muestra el ensamble de las piezas necesarias para la fabricación.

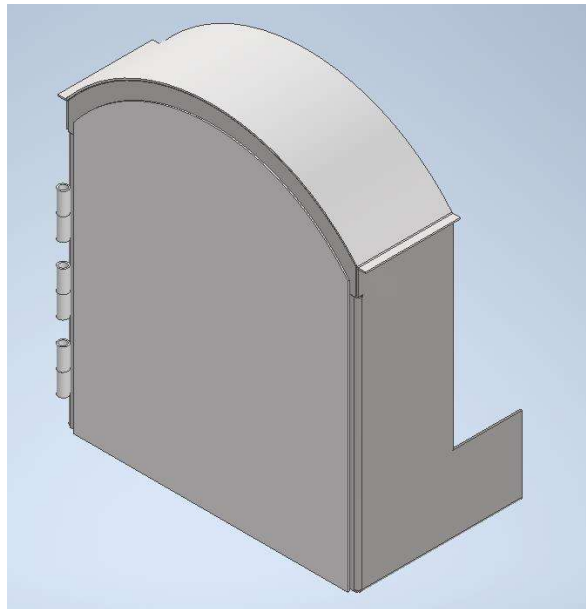


Figura 26. Piezas necesarias para la remodelación del horno. Elaboración propia.

A su vez, se realizó el dibujo del resultado esperado, el cual permitió estimar el número de refractarios a conseguir y el diseño de la solera, como puede verse en la Figura 27.

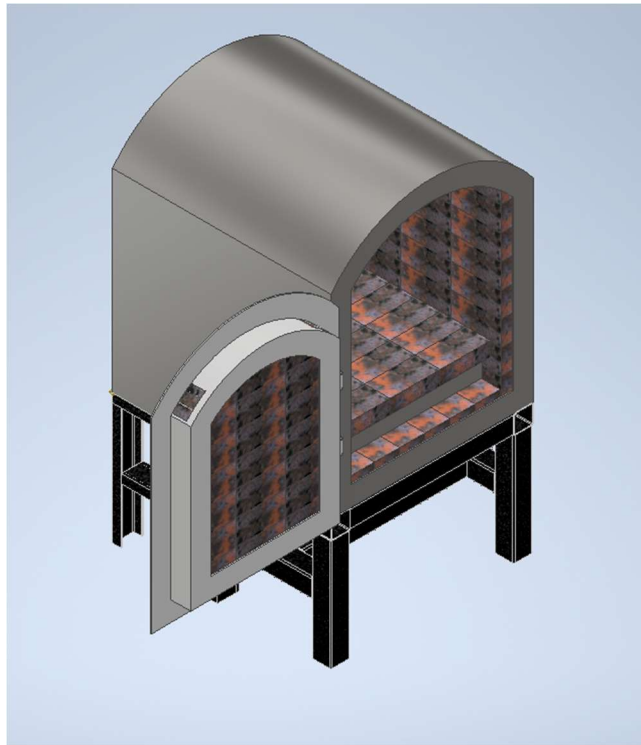


Figura 27. Ensamble del sistema propuesto. Elaboración propia.

La Tabla 5 presenta el resumen de los costos estimados para la implementación de la alternativa de mejora seleccionada.

Tabla 5. Costos estimados de implementación del proyecto.

Inversión Mejora	
Ladrillos	1544620
Lámina	575047,08
Perfil	262499,8
Lana cerámica	255850
Controlador	121830
Mano de obra	2300000
Total estimado	5059846,88

Adicionalmente, cabe considerar en los costos del proyecto el apoyo económico brindado al practicante por parte de la empresa, el cual tuvo un valor de COP 6000000 en total, teniendo en cuenta el dinero percibido por el estudiante y los aportes en salud respectivos.

8. Sistema de control

A grandes rasgos, el sistema de control del horno debe actuar dependiendo de la diferencia de temperatura que exista entre el valor deseado y el valor medido, buscando que esta diferencia sea la menor posible. Para lograr esto se debe encender el quemador si la temperatura está por debajo del valor deseado, y apagarse si la temperatura está cerca del valor deseado.

Para efectuar la acción de control se decidió implementar un control difuso, de forma que se pueda controlar el tiempo que permanece encendido el quemador dentro de unos ciclos establecidos dependiendo del error y del cambio en el error que se presenten en el sistema al momento de la medición. De esta manera se produce lo que se conoce como fuego pulsado, un tipo de control de la combustión en el que se intercalan dos estados para favorecer la turbulencia y la transferencia de calor por convección, con el consecuente ahorro de combustible.[20]

Se establecieron funciones de pertenencia para el error y el cambio en el error. Dependiendo de la magnitud de estas mediciones se asocia un porcentaje de pertenencia a los conjuntos difusos definidos. Para el caso del error la función de pertenencia se definió como se muestra en la Figura 28. Puede verse que se considera que el error es 100% negativo o 100% positivo si $\text{error} < -15^\circ\text{C}$ o $\text{error} > +15^\circ\text{C}$. En valores más cercanos a cero la pertenencia al conjunto Positivo o Negativo disminuye mientras aumenta la pertenencia al conjunto de Cero.

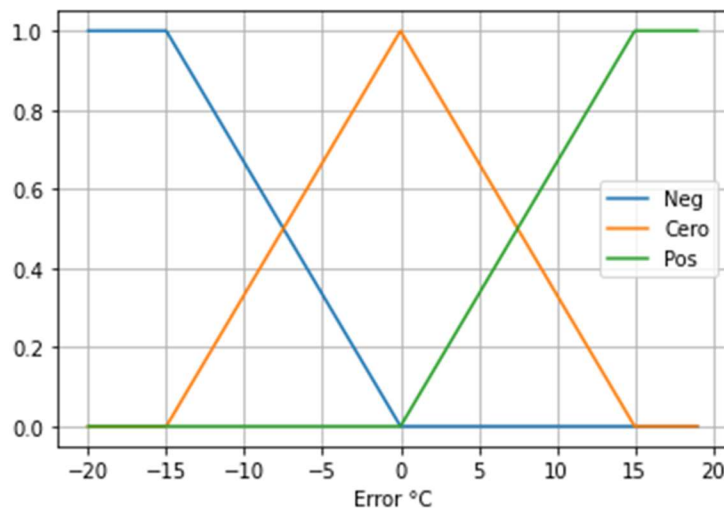


Figura 28. Función de pertenencia del error. Elaboración propia.

Similarmente, la Figura 29 presenta la función de pertenencia del cambio en el error. Se aprecia que se considera una pertenencia del 100% al conjunto Negativo si $d\text{Error} < -6^\circ\text{C}$ y una pertenencia de 100% al conjunto Positivo si $d\text{Error} > +6^\circ\text{C}$.

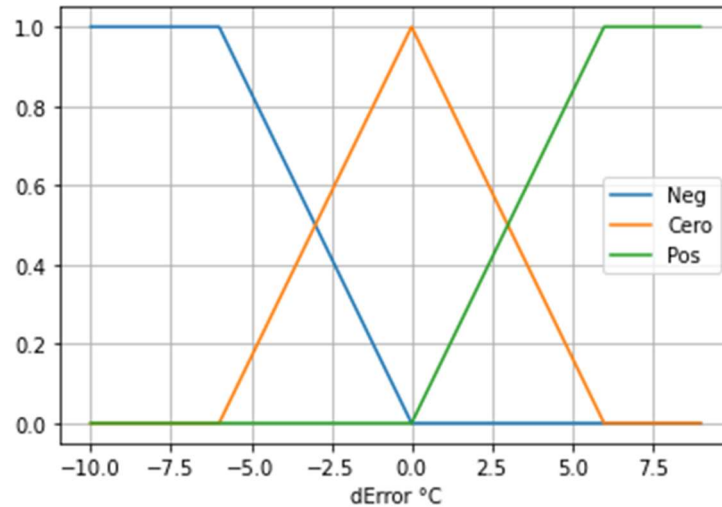


Figura 29. Función de pertenencia del cambio en el error. Elaboración propia.

8.1.1. Selección de hardware

Como elemento de control se seleccionó una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32, la cual se puede programar usando el entorno de Arduino IDE. La tarjeta cuenta con comunicación WiFi, lo que permite crear un entorno web para la interfaz de usuario desde la que se pueda consultar la temperatura del proceso y al mismo tiempo asignar los valores deseados de temperatura y tiempo de sostenimiento del tratamiento. El microcontrolador es además el elemento encargado de efectuar la acción de control sobre el sistema.

Para realizar la medición de la temperatura se decide emplear una termocupla tipo K que es adecuada para el rango de temperaturas en que debe operar el horno según los tratamientos térmicos que efectúa la empresa. Para acondicionar la señal de la termocupla al microcontrolador se utiliza un módulo MAX6675, diseñado especialmente para este fin.

Con el fin de acoplar la etapa de control y la etapa de potencia en el sistema se decide emplear un relé de estado sólido, que permitirá controlar el envío de la señal de encendido al quemador en el momento que se requiera.

Se decide utilizar el quemador original del horno, que se encuentra en buen estado según el último reporte de mantenimiento disponible y que permite un amplio rango de potencia térmica para el trabajo.

Se diseñó una caja para ubicar de forma segura los componentes electrónicos dentro del gabinete eléctrico principal, la cual fue diseñada empleando software de dibujo asistido por computador (CAD por sus siglas en inglés) e impresa en 3D para garantizar que cada componente

mantuviera su posición, quedando todos los componentes integrados en un mismo espacio. La Figura 30 presenta el sistema de control desarrollado, junto con la caja fabricada.

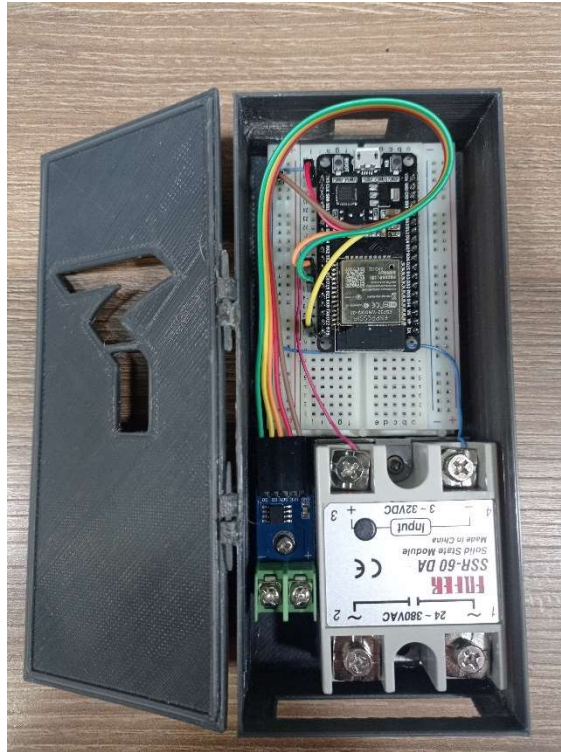


Figura 30. Caja de control. Elaboración propia.

A su vez, la caja de control fue ubicada dentro de un gabinete eléctrico que garantizara la protección del equipo contra los efectos de la exposición al ambiente industrial, el cual se presenta en la Figura 31.



Figura 31. Tablero de control del horno. Elaboración propia.

8.1.2. Programación

Se realizó la programación del microcontrolador utilizando el software Arduino IDE, con los complementos necesarios para utilizar el entorno de programación con el ESP32.

El programa que se implementó incluye un servidor web con las siguientes características:

- Protección con contraseña para que solo el personal autorizado pueda controlar el proceso.
- Campos de ingreso de texto para fijar los valores deseados de temperatura y tiempo de sostenimiento.
- Gráfico de la temperatura en tiempo real para monitorear el proceso.
- Posibilidad de finalizar la sesión para evitar que otras personas hagan cambios en el proceso.

El servidor desarrollado puede accederse vía internet usando la dirección IP del controlador en la red WiFi de la empresa. También puede accederse a él a través de la red WiFi propia del

microcontrolador en caso de que por algún motivo no esté disponible la conexión a través de internet. Se puede realizar la conexión al servidor desde dispositivos móviles o desde los computadores de mesa de la empresa.

La Figura 32 presenta la interfaz de usuario del servidor desarrollado.



Figura 32. Interfaz de usuario. Elaboración propia.

La interfaz brinda al usuario mensajes que le indican el estado del proceso. Existen diferentes mensajes que puede recibir el usuario y comprenden las siguientes situaciones:

- **En proceso:** El sistema se encuentra funcionando con normalidad, se encuentra en etapa de calentamiento.
- **Sosteniendo:** Aparece en la etapa de sostenimiento, muestra el tiempo que se ha programado para el sostenimiento y el tiempo restante de tratamiento.
- **El proceso ha finalizado:** Se llevó a cabo el tratamiento térmico con éxito, se muestra el tiempo de proceso en minutos.
- **Error de termocupla:** Si por algún motivo el controlador no recibe la señal de la termocupla el sistema arroja este mensaje y detiene el funcionamiento del quemador por seguridad.

Adicionalmente, durante el proceso térmico el microcontrolador registra la temperatura y el tiempo. Estos datos son enviados vía correo electrónico al finalizar el tratamiento para llevar un registro del proceso y analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de trabajo. Los datos son enviados en un archivo de texto que pueda ser analizado en una hoja de cálculo convencional.

9. Procesos de manufactura

Todos los procesos de manufactura necesarios para la fabricación de las mejoras para el horno, así como el personal para ejecutarlos fueron dispuestos por la empresa. Durante la ejecución del proyecto fueron utilizados los siguientes procesos de manufactura.

- Corte de láminas con plasma en máquina CNC. Se cortaron las láminas con las geometrías necesarias para la fabricación, de manera que fuera fácil el armado.
- Corte en frío con cizalla. Se cortaron flejes que aportan rigidez a la cúpula del horno
- Corte en sierra. El material para las bisagras fue cortado en sierras sinfín.
- Corte plasma manual. El corte de los perfiles necesarios para las bases del horno y la solera se cortaron de forma manual.
- Rolado de lámina para la cúpula del horno.
- Doblado de lámina para las paredes laterales y la puerta.
- Armado y soldadura.

Se presenta en la Figura 33 el resultado final obtenido al finalizar el proceso de fabricación.



Figura 33. Resultado final de la fabricación. Elaboración propia.

10. Pruebas y puesta a punto

Se llevaron a cabo pruebas en diferentes condiciones buscando la mejor configuración para la operación del horno después de las modificaciones realizadas. Durante cada prueba se monitoreó el comportamiento del horno a través del servidor web, de forma que con los datos recolectados se pudieran comparar las diferentes pruebas. A partir de las pruebas realizadas se tomaron acciones que permitieron ajustar el comportamiento del horno a las necesidades de la compañía.

10.1. Prueba 1

Temperatura de proceso: 800°C

Hora de inicio: 8:00 am.

Hora de finalización: 16:46 pm.

Temperatura alcanzada: 681 °C

Observaciones:

- La prueba fue finalizada sin que el horno alcanzara la temperatura deseada.

- Se abrió el horno varias veces para verificar el color de las piezas y su temperatura superficial mediante medición con pirómetro infrarrojo. Las piezas alcanzaron una temperatura de 750°C y un color rojizo.
- Las piezas obtuvieron niveles de dureza aceptables, aunque cercanos al límite superior del estado de suministro del material.

Decisiones:

- Se reacomodan los ladrillos de la solera con el fin de permitir un mayor flujo de los gases hacia el interior del horno.
- Se acondiciona la chimenea del horno para permitir la salida de los gases calientes.

10.2. Prueba 2

Temperatura de proceso: 800°C

Hora de inicio: 8:00 am.

Hora de finalización: 16:53 pm.

Temperatura alcanzada: 635,75°C

Observaciones:

- La prueba fue finalizada sin que el horno alcanzara la temperatura deseada.
- El horno permaneció cerrado durante toda la prueba
- La compuerta de la chimenea permaneció cerrada al 50% durante toda la prueba.
- Las piezas obtuvieron niveles de dureza aceptables

Decisiones:

- Se decide realizar una prueba en vacío del horno para verificar el comportamiento.
- Se realizan agujeros a la parrilla para permitir una mayor salida de los gases calientes hacia el interior del horno.

10.3. Prueba 3

Temperatura de proceso: 600°C

Hora de inicio: 8:00 am.

Hora de finalización: 13:10 pm.

Temperatura alcanzada: 405°C

Observaciones:

- Para esta prueba se retiraron los ladrillos de la solera y no se introdujo material a recocer para evaluar el comportamiento del horno en vacío.
- La prueba fue finalizada sin que el horno alcanzara la temperatura deseada. Se toma la decisión al notar poco aumento en la temperatura del horno.
- El horno permaneció cerrado durante toda la prueba
- La compuerta de la chimenea permaneció cerrada al 50% durante toda la prueba.
- Se determina que el control no estaba recibiendo una lectura apropiada de la temperatura al comprobar con el pirómetro que la temperatura en la solera era muy elevada con respecto a la temperatura leída por la termocupla.

La Figura 34 presenta el comparativo de las lecturas del pirómetro para la parrilla de la solera y la pared donde se ubica la termocupla, cerca de la cúpula del horno.



Figura 34. Diferencias en la lectura de temperatura en la zona de la solera y la cúpula. Elaboración propia.

Decisiones:

- Se decide aumentar la longitud sumergida de la termocupla en busca de conseguir una lectura más apropiada de la temperatura del interior del horno. Por recomendación de fabricantes de este tipo de sensores la longitud sumergida debe ser de al menos diez veces el diámetro del tubo protector.
- Se ajusta la llama del quemador en aras de realizar una combustión más turbulenta, que permita mayor uniformidad en la atmósfera del horno.

10.4. Prueba 4

Temperatura de proceso: 600°C

Hora de inicio: 6:00 am.

Hora de finalización: 11:40 am.

Temperatura alcanzada: 608°C

Observaciones:

- La prueba finalizó satisfactoriamente habiendo realizado el calentamiento y sostenimiento en la temperatura deseada.
- El horno permaneció cerrado durante toda la prueba.
- La compuerta de la chimenea permaneció abierta durante toda la prueba.
- Al finalizar el ciclo de tratamiento se abrió la puerta del horno para tomar la lectura de la temperatura de las piezas con el pirómetro. Se encontró que la diferencia en la lectura de temperatura por parte de la termocupla y la del pirómetro había disminuido en comparación con pruebas anteriores.

Decisiones:

- Se ajusta el control del horno para permitir un sobre impulso que garantice que el sistema alcance la temperatura deseada.
- Se incluye un indicador adicional del proceso en el servidor web.

10.5. Prueba 5

Temperatura de proceso: 700°C

Hora de inicio: 6:00 am.

Hora de finalización: 15:23 pm.

Temperatura alcanzada: 712,75°C

Observaciones:

- Se observó que la distribución del calor no era uniforme en la parrilla de la solera. La posición de la salida de la llama del quemador favorecía el calentamiento excesivo del centro de la solera.
- Las piezas alcanzaron los 800°C al final de la prueba, de acuerdo con la lectura del pirómetro.

Decisiones:

- Se decide reubicar el quemador, de forma que la llama del quemador ingrese al horno por una de las paredes laterales, pasando por debajo de la parrilla de la solera.

10.6. Prueba 6

Temperatura de proceso: 700°C

Hora de inicio: 16:04 pm.

Hora de finalización: 00:46 pm.

Temperatura alcanzada: 700°C

Observaciones:

- Las piezas presentaron descarburación, dando indicios de que la temperatura que alcanzaron las piezas estuvo por encima de la temperatura de proceso establecida.

Decisiones:

- Se decide realizar una prueba diurna con una temperatura de proceso más baja para evaluar la temperatura real alcanzada por las piezas.

10.7. Prueba 7

Temperatura de proceso: 650°C

Hora de inicio: 8:08 am.

Hora de finalización: 14:47 pm.

Temperatura alcanzada: 658°C

Observaciones:

- Se midió la temperatura de las piezas al llegar a la temperatura de proceso, encontrando que las piezas se encontraban cerca a los 800°C, lo cual no concordaba por lo registrado por el controlador. De acuerdo a cartas de color para tratamientos térmicos se constató que el color de las piezas indicaba una temperatura superior a la registrada por la termocupla. El color de las piezas y del punto donde se ubica la termocupla al momento de la prueba puede verse en la Figura 35. En la Figura 36 se presenta una carta de color para tratamientos térmicos



Figura 35. Temperatura de piezas finalizando la prueba 7. Elaboración propia.

Temperature		Color of Heated Carbon Steel
(°F)	(°C)	
2192	1200	
2012	1100	
1922	1050	
1796	980	
1706	930	
1598	870	
1490	810	
1400	760	
1292	700	
1202	650	
1112	600	

Figura 36. Carta de color para tratamientos térmicos del acero. Tomada de:[21]

Decisiones:

- Se decide reubicar la termocupla de acuerdo con recomendaciones de la ASM[22] para el uso de este tipo de sensores en procesos industriales. La Figura 37 presenta recomendaciones para diferentes tipos de procesos.

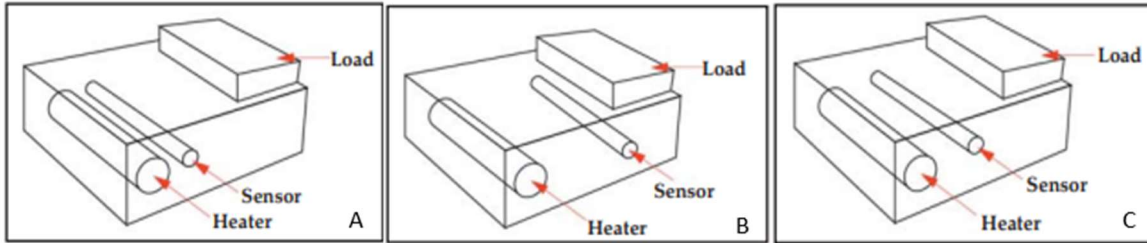


Figura 37. Ubicación recomendada para termocuplas en procesos de calentamiento. A: Sistema estático, B: Sistema dinámico, C: Combinación de sistemas estático y dinámico. Adaptada de: [22]

Se define un sistema como estático como aquél en el que se pretende mantener constante la temperatura de la carga. Las variaciones de temperatura en estos sistemas son pequeñas y se recomienda ubicar la termocupla cerca de la fuente de calor para disminuir los retrasos en la transferencia de calor al sensor.

Por otro lado, un sistema dinámico es en el que la variación requerida en la temperatura de la carga es notable. Ubicar el sensor cerca de la carga permite que se registren los cambios en la temperatura de la carga con rapidez y que se tomen las acciones de control correspondientes.

Una combinación de los sistemas estático y dinámico se presenta cuando la demanda de calor no es la misma durante todo el proceso. Es el caso de los tratamientos térmicos, en los que se requiere elevar la temperatura de una carga hasta un valor deseado y mantener esa temperatura durante un tiempo determinado. La ubicación recomendada para estos sistemas equidistante entre la carga y la fuente de calor.

La Figura 38 presenta la ubicación de la termocupla seleccionada teniendo en cuenta los procesos de carga y descarga, procurando la integridad del sensor, así como una mejora en la respuesta del mismo.



Figura 38. Reubicación de la termocupla. Elaboración propia.

A modo comparativo, las Figuras 39 a 40 presentan el comportamiento de la temperatura al interior del horno en la primera y la última prueba respectivamente.

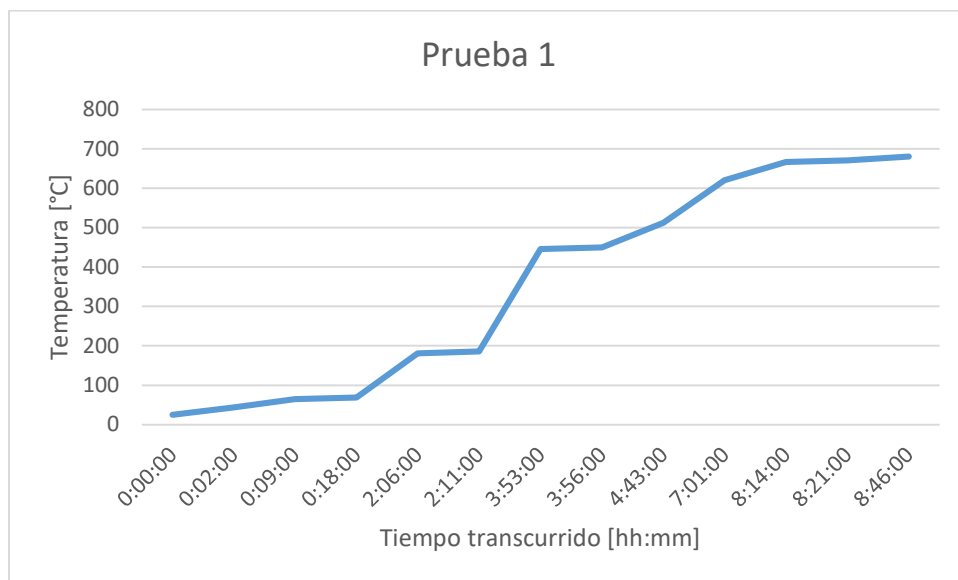


Figura 39. Evolución de la temperatura en la prueba 1. Elaboración propia.

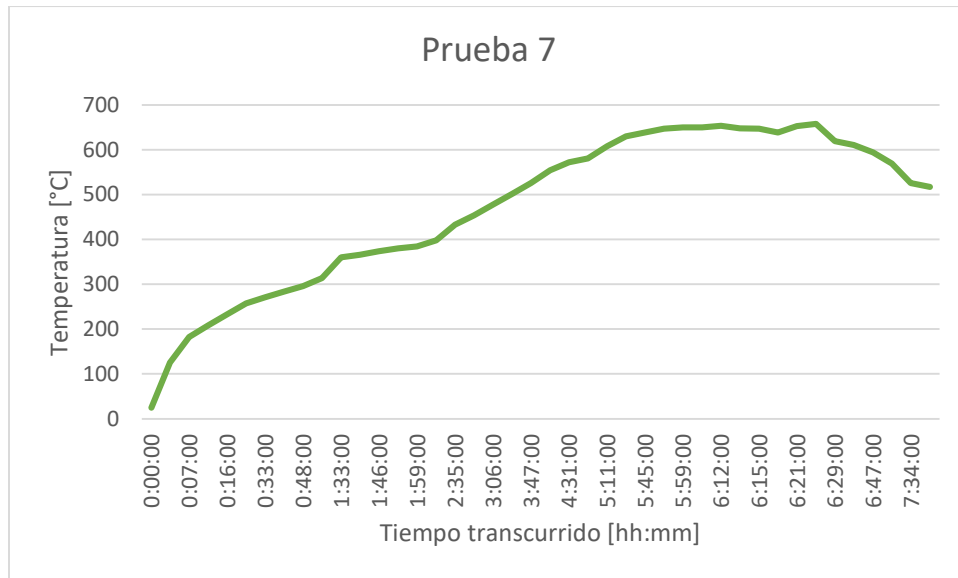


Figura 40. Evolución de la temperatura en la prueba 7. Elaboración propia.

Es de notar que el comportamiento de las tres primeras pruebas es similar, aun cuando en la primera prueba realizada se alteró el ciclo al abrir la puerta del horno durante el calentamiento. Solo se aprecia un cambio significativo en la prueba 4, en la que la curva de la temperatura claramente se estabilizó alrededor de la temperatura deseada. Con estos resultados en mente se decide continuar la operación del horno con la configuración de la prueba 4. Es posible apreciar que la longitud sumergida de la termocupla afecta en gran medida la lectura de la temperatura en el sistema y que esta longitud debe ser lo más grande posible para obtener lecturas acordes a la realidad.

11. Pruebas de dureza

Se realizaron pruebas de dureza a algunas de las probetas que fueron sometidas a calentamiento durante la puesta a punto del horno. Esto permitió verificar el estado de las piezas al salir del horno con las modificaciones realizadas y validar el proceso de puesta a punto.

Tabla 6. Registro de pruebas de dureza.

Registro pruebas de dureza										
No. Probeta	Espesor [mm]	No. Prueba	Estado	Cara del corte			Cara sin afectación			Unidades Dureza
				Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	
1	155	0	0	269	277	294	148	150	160	HB
2	155	1	2	223	224	226	143	139	144	
3	155	1	2	205	214	228	149	145	147	
4	155	1	2	225	236	235	140	140	144	
5	155	1	2	238	242	239	144	140	145	
6	155	5	2	186	188	187	150	147	152	
7	155	5	2	209	213	208	156	152	148	
8	155	7	2	210	211	210	158	151	152	
9	155	7	2	206	219	221	158	151	153	
10	155	7	2	221	223	213	155	153	148	

Se aprecia como a través de las pruebas realizadas la dureza de las probetas en la cara del corte se redujo, quedando dentro de los rangos del estado de suministro para el AISI/SAE1045 (Entre 180 y 230 HB).

Es de resaltar que piezas de este espesor se trataban únicamente en el horno grande antes de la modificación del horno pequeño. Con la posibilidad de tratar térmicamente piezas de mayores espesores en el horno pequeño se amplía el potencial de utilización del horno, lo que supone ahorros para la compañía.

12. Eficiencia del sistema

Se repitió el análisis presentado en la sección 4.4 para comparar la eficiencia del sistema en las condiciones finales contra las condiciones iniciales. Se obtuvo una eficiencia del 20,5% y una distribución de las pérdidas energéticas que se presenta en la Figura 41.

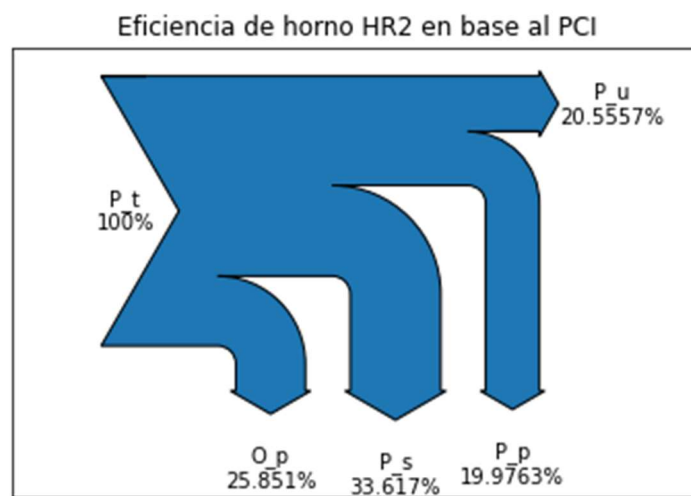


Figura 41. Eficiencia del proceso en las condiciones finales.

13. Resultados del proyecto

Se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación del proyecto de mejoras tecnológicas en el horno de tratamientos térmicos de la empresa Ferrocortes.

- Se aumentó el potencial de utilización del horno pequeño de un 20,7% a un 71,4%. Esto se debe al aumento en capacidad del horno y al sistema de control implementado, que permite tratar cargas de diferentes masas sin intervenir de manera sustancial los parámetros del controlador.
- Las pruebas de dureza realizadas indican que las piezas cumplen con los límites establecidos en normas.
- El costo estimado del proyecto era de \$5'077.000. El costo real del proyecto fue de \$4'601.000. Se obtuvo el costo real de la intervención a partir de los materiales y operaciones reportadas en el ERP de la empresa. Adicionalmente, hubo un apoyo económico total al practicante por COP 6000000.
- Con los datos analizados, utilizando el horno pequeño se obtiene un ahorro del 46,97% en consumo de combustible en comparación con el consumo del horno grande, como puede apreciarse en la Figura 42, en la que se presentan los consumos promedio de gas por ciclo para los dos hornos de la empresa y su valor en pesos colombianos.

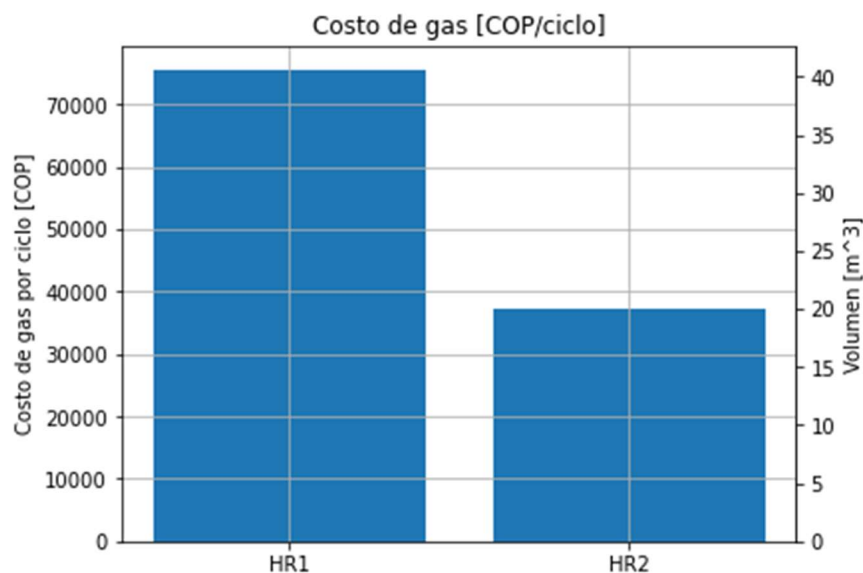


Figura 42. Comparativo de consumo de gas para los hornos de la empresa. Elaboración propia.

- El ahorro de combustible representa para la empresa un ahorro estimado en COP3'136.628. Teniendo en cuenta lo anterior, se estima que el retorno de la inversión de la mejora se logre en un periodo de 1.5 años.
- Se desarrolló para la compañía un equipo de tratamiento térmico que puede ser monitoreado a distancia a través de internet y que genera reportes automáticos de los valores del proceso. Este es un paso más que da la empresa hacia la transformación digital con la implementación de IoT en sus procesos.
- Se capacitó al personal de producción en cuanto a la operación del horno desde el tablero eléctrico y la aplicación web desarrollada. Así mismo, se capacitó al personal de sistemas en lo correspondiente a la programación del dispositivo instalado.

14. Conclusiones

- El conocimiento de los procesos que se realizan dentro de una empresa permite a la misma implementar acciones que contribuyan a la mejora de estos en busca de estar a la vanguardia tecnológica y obtener resultados con la calidad deseada.
- La implementación de tecnologías IoT en la industria permite la conexión remota con los equipos para monitorear el estado de los procesos y tomar las acciones ligadas con bases en los datos recolectados de los mismos procesos.
- Las técnicas de control difuso permiten un manejo de la temperatura en sistemas de calentamiento en rangos estrechos de la variable, por lo que resultan adecuadas para la implementación en sistemas de tratamiento térmico.
- Según los resultados obtenidos en el análisis de eficiencia se recomienda realizar una optimización de la combustión en el horno para verificar las condiciones de la combustión y de esa manera implementar acciones de optimización que permitan un mayor beneficio para la empresa.

15. Referencias

- [1] P. Molera, *Tratamiento térmico de los metales*. 1991.
- [2] R. Timings, *Fabrication and Welding Engineering*. 2008.
- [3] J. Toasa, "Estudio de sistemas automatizados de temperatura aplicados en tratamientos térmicos y su incidencia en las propiedades de los aceros en el laboratorio de ingeniería civil y mecánica," 2012.

-
- [4] E. Torres, “Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros,” 2004. Accessed: Jun. 22, 2022. [Online]. Available: https://silo.tips/queue/apuntes-acerca-del-tratamiento-termico-y-la-clasificacion-general-de-los-aceros?&queue_id=1&v=1655998147&u=MTkwLjAuMzguMjIy
- [5] A. Valencia, *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*, 2nd ed. Editorial Universidad de Antioquia, 1992.
- [6] N. Peña, “Perfeccionamiento de los parámetros técnicos y constructivos en el horno de tratamientos térmico de la UEB fundición,” 2019.
- [7] A. Jara, “Metodología de diseño de hornos para tratamiento térmico de distensionado de grandes piezas ferrosas de minería,” 2020.
- [8] P. Gil, “Diseño y prefabricación de un horno para el proceso de forjado,” 2019.
- [9] “Transferencia de-calor y masa. Fundamentos y aplicaciones Cuarta Edición”.
- [10] “Transmisión de Calor Uned”.
- [11] *Designation: A 956 – 02 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products 1.*
- [12] *Designation: E18 – 19 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.* 2019. doi: 10.1520/E0018-19.
- [13] L. Herrera and E. Vásquez, “Diseño, programación e instalación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno lindberg para el laboratorio de tratamientos térmicos,” 2011.
- [14] D. Shi, G. Gao, Z. Gao, and P. Xiao, “Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace,” in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 29, pp. 257–261. doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.703.
- [15] S. Andrés Castaño Giraldo, D. Santiago Hernández Gómez, and J. Hugo Gallo Blandón, “Control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controles PI,” 1900.
- [16] D. J. López Amado, D. García, L. Davico, and S. Verrastro, “Controlador Difuso Multivariable del Perfil de Temperatura de un Horno.”
- [17] D. E. Agudelo, “Introducción a la lógica difusa.” 2022.
- [18] K. M. Passino and Stephen. Yurkovich, *Fuzzy control*. Addison-Wesley, 1998.

-
- [19] “BTG 3 50-60Hz - Quemadores Baltur.”
http://www.baltur.com/ww/es/productos/quemadores/quemadores_de_gas/btg_3_50-60hz
(accessed Jul. 28, 2022).
- [20] M. Giacomo, “Pulse firing as a combustion control method-Part 1,” 2019.
- [21] “Steel Tempering Colors.” https://www.engineeringtoolbox.com/tempering-colors-steel-d_1530.html (accessed Sep. 26, 2022).
- [22] A. Volbrecht, “Guidelines for good thermocouple Practice,” St. Louis, Mo., May 2017. Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.asminternational.org/documents/10192/1915068/htp00703p048.pdf/236107c7-ec38-40e6-8ecc-51a23dfefaa4>

16. Anexos

Anexo 1: Propiedades del aire a presión de 1 atm. Tomado de: [9]

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.