



"Implementación de un horno tipo mufla para tratamientos térmicos en piezas metálicas de uso automotriz e industrial mediante la utilización de dispositivos electromecánicos, en el laboratorio de la carrera de tecnología en electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L".

Manrique Suarez, Nipzon Orlando

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Tecnología en Electromecánica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Tecnólogo en:

Electromecánica

Ing. Masapanta Chicaiza, Jaime Gonzalo.

06 de agosto del 2020



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación , **"IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO TIPO MUFLA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN PIEZAS METÁLICAS DE USO AUTOMOTRIZ E INDUSTRIAL MEDIANTE LA UTILIZACION DE DISPOSITIVOS ELECTROMECAÁNICOS, EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L"** fue realizada por el señor **MANRIQUE SUAREZ, NIPZON ORLANDO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 04 de agosto del 2020



ING. MASAPANTA CHICAIZA, JAIME GONZALO

C.C.: 0502823800

REPORTE DE VERIFICACIÓN**Urkund Analysis Result**

Analysed Document: proyecto mufla MANRIQUE N.docx (D77402819)
Submitted: 8/3/2020 4:06:00 AM
Submitted By: jgmasapanta@espe.edu.ec
Significance: 5 %

Sources included in the report:

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO 22 ULTIMO 22.docx (D9362277)
1566348015_298_PAR_112-_KAREN_STEFANIA_LÓPEZ_LOAIZA_-_TRATAMIENTOS_TERMICOS.pdf (D54930417)
<https://es.slideshare.net/LoliVegaOmaa/t3-tratamientos-termicos>
<https://docplayer.es/41014447-Universidad-tecnica-de-cotopaxi.html>

Instances where selected sources appear:

16

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "J. Masapanta", written over a horizontal line.

Ing. Masapanta Chicaiza, Jaime Gonzalo**DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **MANRIQUE SUAREZ, NIPZON ORLANDO**, con cedula de identidad N° 1003552500, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación : **"IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO TIPO MUFLA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN PIEZAS METÁLICAS DE USO AUTOMOTRIZ E INDUSTRIAL MEDIANTE LA UTILIZACION DE DISPOSITIVOS ELECTROMECAÁNICOS, EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 04 de agosto del 2020



MANRIQUE SUAREZ, NIPZON ORLANDO

C.C.: 1003552500



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **MANRIQUE SUAREZ, NIPZON ORLANDO**, con cedula de identidad N° 1003552500, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación **"IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO TIPO MUFLA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN PIEZAS METÁLICAS DE USO AUTOMOTRIZ E INDUSTRIAL MEDIANTE LA UTILIZACION DE DISPOSITIVOS ELECTROMECAÁNICOS, EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 04 de agosto del 2020

MANRIQUE SUAREZ, NIPZON ORLANDO

C.C.: 1003552500

DEDICATORIA

El presente proyecto realizado para mi graduación se lo dedico a mi hijo Dante y mi esposa Maritza quienes son fuente de amor y motivación para cumplir los retos y metas de la vida además de permanecer a mi lado en cada momento sea bueno o malo brindándome su apoyo.

A mis padres Luz y Miguel quienes fueron los que cultivaron en mis valores importantes como la confianza, valentía, esfuerzo y dedicación; esenciales para tomar esta oportunidad de vida y aprovecharla de mejor manera.

MANRIQUE SUAREZ NIPZON ORLANDO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios quien me ha bendecido en cada momento de la vida y al darme unos padres llenos de amor y dedicación que se convirtieron en ejemplo de personas intachables y trabajadoras modelando mi persona desde pequeño con consejos y respaldo para iniciar en el camino de convertirme en un profesional.

Agradezco a mi esposa quien se convirtió un pilar fundamental en esta etapa de formación profesional en la cual gracias a su intervención con amor, paciencia y apoyo hoy estoy logrando un importante hito en mi vida.

MANRIQUE SUAREZ NIPZON ORLANDO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	1
CERTIFICACIÓN	2
REPORTE DE VERIFICACIÓN.....	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.....	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPITULO I	
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1 Tema de Investigación.....	17
1.2 Antecedentes.....	17
1.3 Planteamiento del problema	18
1.4 Justificación	18
1.5 Objetivos.....	19
1.5.1 Objetivo General.....	19
1.5.2 Objetivos Específicos.....	19
1.6 Alcance.....	20

CAPITULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1	Introducción	22
2.2	Horno Eléctrico Mufla.....	22
2.2.1	Principio de Funcionamiento.....	24
2.2.2	Componentes de una mufla eléctrica.....	25
2.2.3	Cómo Utilizar un Horno Mufla	28
2.2.4	Cuidados y Precauciones de la Mufla de Laboratorio	29
2.3	Tratamientos Térmicos en Metales	29
2.4	Propiedades Mecánicas de los Materiales	30
2.5	Etapas en los Tratamientos Térmicos.....	31
2.5.1	Calentamiento.....	31
2.5.2	Mantenimiento a temperatura constante	33
2.5.3	Enfriamiento.....	33
2.6	Tipos de Tratamientos Térmicos.....	34
2.6.1	Temple.....	34
2.6.2	Recocido.....	42
2.6.3	Revenido	44
2.6.4	Normalizado.....	46
2.7	Importancia y ventajas de los tratamientos térmicos	47
2.8	Termodinámica.....	48
2.8.1	Primera Ley de la Termodinámica	49

	10
2.8.2 Segunda Ley de la Termodinámica.....	50
2.9 Transferencia de Calor	50
2.9.1 Conducción.....	50
2.9.2 Conductividad Térmica	51
2.9.3 Convección	52
2.9.4 Radiación.....	53

CAPITULO III

3. IMPLEMENTACIÓN

3.1 Consideraciones Generales.....	56
3.2 Selección del Material.....	57
3.2.1 Resistencias de Kanthal A1	60
3.2.2 Relé de estado sólido	62
3.2.3 Termopar tipo K.....	64
3.2.4 Controlador de Temperatura REX-C100	65
3.3 Cámara Interna del Horno Mufla.....	67
3.4 Cantidad de Calor Hacia la Carga	68
3.4.1 Calculo de la Masa de Aire en la Cámara Interna del Horno.....	69
3.4.2 Calculo del Calor Necesario Para Calentar el Material a Tratarse...71	
3.5 Estudio de la Transferencia de Calor del Horno Mufla	72
3.5.1 Calculo de Pérdidas de Calor	73
3.5.2 Resistencias Térmicas en las Paredes del Horno	74
3.6 Rendimiento Térmico.....	82

3.7 Cálculo de la Potencia del Horno.....	83
3.8 Calculo de la Resistencia y Corriente de Trabajo.....	83
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de los tratamientos térmicos en aceros.	48
Tabla 2. Aislantes térmicos.	57
Tabla 3. Ladrillos refractarios.	58
Tabla 4. Mortero refractario.	59
Tabla 5. Características de aleaciones de base Fe-Cr-Al.	61
Tabla 6. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.	69
Tabla 7. Propiedades del acero AISI1010.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno mufla.	24
Figura 2. Cámara interna de la mufla.....	26
Figura 3. Horno mufla.	28
Figura 4. Placa de acero sometidas a calentamiento.....	32
Figura 5. Grafica representativa del temple, temperatura en función del tiempo.	35
Figura 6. Microestructura de acero templado.....	37
Figura 7. Diagrama Fe-C.	38
Figura 8. Diagrama T-s del temple continuo.	39
Figura 9. Diagrama T-s de austenización incompleta.	40
Figura 10. Diagrama T-s del temple escalonado.....	41
Figura 11. Diagrama T-s del temple isotérmico.....	42
Figura 12. Grafica representativa del recocido temperatura en función del tiempo.	43
Figura 13. Microestructura del acero sometido a recocido.	44
Figura 14. Grafica representativa del revenido temperatura en función del tiempo.	45
Figura 15. Microestructura del acero sometido a revenido.	45
Figura 16. Microestructura del acero sometido a la normalización.....	46
Figura 17. Grafica representativa de la normalización T-s.	47
Figura 18. Alambre Kanthal.	60
Figura 19. Representación gráfica del relé de estado sólido.....	62
Figura 20. Relé de estado solido	63
Figura 21. Representación gráfica del termopar.	64
Figura 22. Termopar tipo k.....	65
Figura 23. Controlador de temperatura del REX-C100.	66
Figura 24. Dimensiones de la cámara interna del horno.	67
Figura 25. Pared compuesta en serie.	73

Figura 26. Circuito equivalente para una pared compuesta en serie.....	74
Figura 27. Representación de las paredes del horno.....	76
Figura 28. Estructura metálica modelada en SolidWorks.....	84
Figura 29. Construcción de las paredes del horno mufla.....	84
Figura 30. Corte de canales para la resistencia del horno mufla.....	85
Figura 31. Ensamblaje de las paredes del horno mufla.....	86
Figura 32. Colocación de la termocupla dentro del horno.....	87
Figura 33. Colocación de la manta cerámica alrededor del horno.....	87
Figura 34. Limpieza y aplicación de pintura resistente a altas temperaturas.....	88
Figura 35. Pruebas de conexiones eléctricas del horno.....	89
Figura 36. Pruebas de funcionamiento del horno mufla.....	89
Figura 37. Pruebas de funcionamiento del horno mufla.....	90

RESUMEN

El siguiente trabajo de titulación consiste en la implementación de un horno tipo mufla para tratamientos térmicos en piezas de acero, proceso indispensable en piezas que son utilizadas para mantenimientos automotrices e industriales específicamente en piezas o repuestos. El proyecto está constituido principalmente por materiales refractarios que cubren la cámara interna donde se desarrolla el tratamiento térmico estos ayudan a la conservación del calor producido por la máquina, se emplea el ladrillo refractario, mortero refractario y la fibra cerámica. La generación del calor para el tratamiento térmico se da por medio de una resistencia eléctrica llamada KANTHAL constituida por hierro, cromo y níquel ; el control del accionamiento y el comportamiento de acuerdo a varios requerimientos se da por un sistema eléctrico constituido principalmente por un control de temperatura, una termocupla, un relé de estado sólido, interruptores y luces piloto; los cuales en conjunto brindan un control sobre el proceso que en muchos casos es de manera empírica. Finalmente, la estructura del horno es cubierta con chapa metálica de 3mm y cubierta de pintura resistente a altas temperaturas que ayudara a mantener el equipo libre de inconvenientes y aislando del medio ambiente manteniendo las características sin afectar la constitución del horno.

PALABRAS CLAVES

- **HORNO**
- **TRATAMIENTOS TÉRMICOS**
- **ALTAS TEMPERATURAS**

ABSTRACT

The following titration work consists of the implementation of a muffle-type furnace for heat treatments on steel parts, an essential process in parts that are used for automotive and industrial maintenance, specifically in parts or spare parts. The project is mainly made up of refractory materials that cover the internal chamber where the heat treatment takes place, these help to conserve the heat produced by the machine, using refractory brick, refractory mortar and ceramic fiber. The generation of heat for heat treatment occurs by means of an electrical resistance called KANTHAL consisting of iron, chromium and nickel; the control of the drive and the behavior according to various requirements is given by an electrical system consisting mainly of a temperature control, a thermocouple, a solid-state relay, switches and pilot lights; which together provide control over the process, which in many cases is empirical. Finally, the structure of the furnace is covered with 3 mm sheet metal and covered with paint resistant to high temperatures that will help to keep the equipment free of inconveniences and isolating it from the environment while maintaining the characteristics without affecting the constitution of the furnace.

KEYWORDS:

- **OVEN**
- **THERMAL TREATMENTS**
- **HIGH TEMPERATURES**

CAPITULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Tema de Investigación

Implementación de un horno tipo mufla para tratamientos térmicos en piezas metálicas de uso automotriz e industrial mediante la utilización de dispositivos electromecánicos, en el laboratorio de la carrera de tecnología en electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L.

1.2 Antecedentes

Para brindar a las piezas metálicas empleadas en el mantenimiento automotriz e industrial mejores propiedades en su desempeño y lograr alargar su tiempo de servicio útil y eficiente se desarrolla el proyecto de:

“Diseño y construcción de un horno de fundición de minerales auríferos”, en este proyecto se implementó un horno de dimensiones de largo de 0,48m, un ancho de 0,445 m y una altura de 0,4 m, cuyas pérdidas de calor son (866,93 Watts), y por ende el equipo tiene una potencia de 990 watts. En el Horno eléctrico se identifican dos zonas una de calentamiento rápido que en 20 minutos alcanza los 500°C y una de calentamiento que tarda 30 minutos hasta alcanzar 1064°C, el proceso de fundición tarda 50 minutos. Podemos concluir que, el horno está en condiciones de fundir materiales auríferos hasta temperaturas del orden de los 1200°C. (GUTIERREZ, 2015).

En la actualidad la implementación de la tecnología en diferentes campos, hace posible la tecnificación de procesos artesanales y empíricos por lo que se ha visto necesario implementar el:

“Diseño y construcción de un horno para tratamientos térmicos con interfaz gráfica para comprobación de dureza del material tratado”, el cual permite tratar aceros de diferentes tipos y de tamaño mediano (máximo 90mm x 400 mm y 20kg), la temperatura máxima de operación será de 1000°C, el sensor de temperatura del sistema será una termocupla tipo K, se realizará la automatización del proceso mediante un PLC con una interfaz humano máquina gráfica y táctil la misma que permitirá supervisar el control del proceso. (Quito Abad, 2016).

1.3 Planteamiento del problema

El tratamiento térmico de los metales es un proceso que nunca se ha implementado en los talleres de mantenimiento industrial y automotriz por falta de conocimiento del proceso y excesivos costos de equipos, esto da como resultado fallas en mantenimientos industriales y en estructuras metálicas pequeñas por daño en piezas que se doblan o se parten por falta de tratamientos previos a estos materiales. La falta de importancia que se da al tratamiento térmico provoca estos problemas que generan pérdidas de tiempo y dinero. En pocos casos se utiliza el tratamiento térmico de manera artesanal en el cual es imposible controlar el nivel de temperatura y tiempo de exposición al tratamiento que varía de acuerdo a la característica requerida en el metal, todo esto por falta de automatización en el proceso de calentamiento del metal.

1.4 Justificación

En el desarrollo de habilidades y destrezas de los estudiantes es importante brindar las herramientas necesarias para mejorar su aprendizaje en el sentido de la práctica, ofreciendo instrumentos acordes a la tecnología actual y de importancia en su aplicación.

Es evidente que los estudiantes de carrera técnicas adquieren un mejor conocimiento al brindar la oportunidad de realizar prácticas de procesos, es por eso que es importante la implementación del horno mufla; con el fin de ser una base para futuras investigaciones de desarrollo y aplicaciones en el campo de mantenimiento automotriz e industrial.

Al incluir el proceso en los diferentes campos del mantenimiento automotriz e industrial se garantiza que el mantenimiento será eficiente y con seguridad que el material usado brindará sus características requeridas y mejoradas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Implementar un horno eléctrico tipo mufla mediante el empleo de material refractario, sensores y controladores de temperatura que faciliten la medición y control dentro del proceso de tratamiento de metales, para la utilización del equipo en prácticas de laboratorio de la carrera Tecnología Superior en Electromecánica en el estudio de mecánica de materiales.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Investigar el principio de funcionamiento y el tipo de tratamientos térmicos que ofrece el horno tipo mufla a través de la recopilación de fuentes bibliográficas, para la comprensión del trabajo que desempeña el horno y cada uno de sus componentes.
- Analizar los requerimientos en la implementación del horno eléctrico tipo mufla para el proyecto mediante el empleo del software de diseño SolidWorks.

- Seleccionar los materiales que cumplan y se adapten las propiedades necesarias en la construcción del horno eléctrico tomando en cuenta la temperatura máxima y el tiempo de exposición del tratamiento térmico de los metales.
- Monitorear el funcionamiento del horno eléctrico y de la estructura mediante la variación de altas temperaturas para definir la calibración en la programación y el correcto manejo del horno eléctrico.

1.6 Alcance

El presente trabajo de investigación está enfocado a implementar el tratamiento térmico en los procesos de mantenimiento de vehículos y estructuras metálicas, además de eliminar procesos artesanales que se venían haciendo, ya que de esta manera empírica no se logra los efectos deseados en los metales.

El horno estará constituido de una cámara interna dimensionada en base de 30cm, altura 30cm y profundidad igual a 40 cm, con la finalidad de realizar tratamientos térmicos de piezas metálicas pequeñas, para lo cual también se utilizará distintos materiales como ladrillo refractario, lana de vidrio y lamina metálica. Con lo que se obtiene una cámara apropiada para realizar diferentes procesos a distintas temperaturas.

En el control de proceso de tratamiento térmico se implementará un control de temperatura programable mediante el cual se permite la visualización y selección de la temperatura acorde al proceso térmico que se desea realizar, además de conocer la temperatura que está en el interior del horno, el mismo brinda la facilidad de seleccionar

varias temperaturas que se provee la máxima sea 900°C . Las resistencias eléctricas o niquelinas son las encargadas de proveer y mantener el calor necesario para calentar el horno por lo que su funcionamiento es con corriente alterna de 220V.

Este trabajo de investigación brindara seguridad en el proceso de calentamiento de los metales y censara la temperatura ideal para el proceso que se requiera mediante sensores y un controlador de temperatura, de esta manera realizar un tratamiento de metal ideal, eficaz y seguro.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Introducción

En el presente trabajo se realizará el estudio y análisis de un horno eléctrico tipo mufla utilizado comúnmente en laboratorios para tratamientos térmicos de metales o fundición en ciertos casos, se basa en el empleo de energía térmica producida por resistencias eléctricas las cuales dependen de un controlador de temperatura. Este horno es construido empleando materiales refractarios los cuales permiten alcanzar temperaturas de más de 200°C hasta 1200°C.

La temperatura a la que el horno se debe utilizar depende exclusivamente del tipo de tratamiento térmico que se desea dar a una pieza de metal como también del tiempo de exposición y la forma en la que se realice el enfriamiento posterior a la salida del horno.

2.2 Horno Eléctrico Mufla

El horno mufla es un tipo de horno que se construye para trabajar con altas temperaturas, por este motivo es empleado en varios procesos que requieren este tipo de característica como laboratorios en laboratorios, talleres y empresas.

Las muflas son diseñadas con gran variedad de tamaños y resistentes a varias temperaturas para ser aplicadas en variedad de aplicaciones como dentro de un laboratorio y pueden realizar trabajos como: procesos de control, tratamientos térmicos y secado de precipitados.

El horno mufla es una clase de horno que depende del calor proveniente de una resistencia eléctrica que se caracteriza por el tiempo de trabajo y la temperatura a la que puede llegar los 1000°C. el horno mufla está construido por materiales altamente refractarios para trabajos en los que el horno alcance altas temperaturas y las mantenga de forma que se puedan calcinar muestras para su posterior estudio. También es utilizado para brindar tratamientos térmicos a los aceros o metales dispuestos para ello.

La mufla es una cámara cerrada constituida de materiales refractarios capaces de soportar altas temperaturas. Posee una puerta de igual material siendo la pared frontal, que sirve para el ingreso al interior de la cámara de tratamiento, es opcional en el diseño un agujero para ver el interior sin remover la compuerta. También existen muflas que en el techo del horno se ubica un agujero por donde salen los gases de la cámara dependiendo si el tratamiento es con gases. Las paredes del horno mufla son complementadas aparte de materiales refractarios con materiales aislantes. (TP-Laboratorio Químico, 2015).

En comparación de otros instrumentos o máquinas de laboratorio este presenta un alto consumo de electricidad por sus altas temperaturas al estar trabajando, para un empleo seguro hay que atender a varios procedimientos de seguridad con los materiales tratados verificar sus características y la temperatura máxima de exposición y para manejar el horno siempre utilizar protección de la cabeza, pecho y brazos.

Figura 1.

Horno mufla.



Nota. La imagen muestra un horno mufla con cámara interna pequeña. Tomado de (TP-Laboratorio Químico, 2015)

Un horno mufla es una máquina que produce elevadas temperaturas que son empleadas para calentar materiales que posteriormente serán sometidos a procesos de tratamiento térmico. Estos hornos se emplean específicamente dar tratamiento térmico cuando se requieren calentamientos y enfriamientos controlados, por ejemplo, en procesos de soldadura, temple, revenido, recocido, etc. (Schmid, 2008).

2.2.1 Principio de Funcionamiento

En la publicación de (TERLAB S.A, 2018) describe que:

La lectura de temperatura en el interior del horno depende del sensor de tipo termopar, el cual genera un voltaje en sus terminales dependiendo de la temperatura a la que se encuentra expuesto, la señal de voltaje es evaluado por un convertidor analógico digital para procesarse en un controlador digital. Una vez hecha la lectura de medición de la temperatura, el controlador digital PID fija un rango de energía que la cámara de la mufla necesita para mantener la temperatura deseada (Set Point). Para

determinar la cantidad de energía que requiere la mufla, el controlador de temperatura se realiza por medio de un control PID.

El funcionamiento de este equipo se basa en la aplicación de energía térmica, la cual es producida por medio de resistencias eléctricas, las cuales están dispuestas en las paredes laterales y parte posterior del horno, son de hilo resistor de aleación Cr-Al-Fe y capaces de trabajar largos periodos de tiempo. Las resistencias emiten con gran eficiencia el calor a los cuerpos metálicos siempre pasando del cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura. (Falcón, 2017).

Según publicación de (Acequilabs, 2018) afirma que:

La principal función de la mufla es alcanzar altas temperaturas que pueden ser aplicables a una variedad de usos, entre los cuales podemos mencionar:

- Uso de la mufla en tratamientos térmicos
- La mufla sirve para pruebas de calcinamiento
- Horno de alta temperatura se usa para incineración de muestras orgánicas e inorgánicas
- El Horno mufla se utiliza para cocción de materiales cerámicos, entre otros

2.2.2 Componentes de una mufla eléctrica

Según (Acequilabs, 2018) entre las partes de la mufla podemos destacar:

2.2.2.1 Cámara Interna

La cámara interna de la mufla está construida con material refractario compuesto principalmente y en gran mayoría de alúmina y sílice, esto se traduce en la resistencia a

las altas temperaturas de trabajo. En éste mismo material está construida la puerta. Por la misma se accede al interior de la cámara de cocción.

La pared superior de la mufla está tiene un agujero por donde se puede realizar la verificación de temperatura. También tiene la función de liberación de gases que se puedan presentar durante el tratamiento o proceso que se realice dentro del equipo en caso de usar otros gases para el tratamiento térmico.

Figura 2.

Cámara interna de la mufla



Nota. La imagen muestra la cámara interior de un horno mufla con resistencias ubicadas en las paredes laterales. Tomada de (Acequilabs, 2018).

Dentro de la cámara interna de la mufla (Acequilabs, 2018) destacan :

- a) **Elementos Calefactores:** las resistencias que son las encargadas de suministrar el calor en el interior de la mufla. Están ubicadas estratégicamente para que la distribución de la energía calórica sea homogénea en la cámara interna.

b) Termocupla: O sensor de temperatura, es el encargado de enviar una señal eléctrica al control electrónico, para indicarle al mismo a qué temperatura se encuentra la cámara interna de la mufla.

c) Panel de Control

Según (Acequilabs, 2018) detalla que depende del tipo de horno mufla y al uso que se le dará, se puede encontrar varios tipos de control y elementos que la misma pueda poseer. Los más comunes que puede tener la mufla son:

- **Temporizador:** es el que establece el tiempo de trabajo de la mufla. Es decir, el equipo funcionara de acuerdo a lo que anteriormente se ha programado.
- **Control de Temperatura:** es el que maneja y establece la temperatura a la que trabajará el equipo. El tipo de control que normalmente usan las muflas es de tipo PID. Este control funciona de manera que la temperatura de trabajo sea mucho más exacta en la cámara interna de la mufla. Se realiza una programación para evitar la presencia de sobre picos. Con esto se evita el posible daño de las muestras a tratar en la mufla. Es importante mencionar que se pueden adquirir en el mercado muflas con control análogo. Las muflas pueden tener un margen de error mayor en cuanto a precisión se refiere.
- **Interruptor de seguridad:** según normas de fabricación, es de gran importancia que los hornos mufla tengan un interruptor de seguridad en el panel de control. El trabajo de este interruptor es el de cortar el suministro eléctrico.

Figura 3.

Horno mufla.



Nota. El panel de control puede variar de acuerdo al fabricante, puede ser básico o con más detalles para facilitar su uso. Tomado de (Acequilabs, 2018).

2.2.3 Cómo Utilizar un Horno Mufla

Para utilizarlo de forma correcta a este tipo de equipo hay que tomar en cuenta que está diseñada para uso en interiores, a temperatura ambiente entre 15 ° C y 40°C. considerando también la humedad relativa promedio del 80%. Usar estos equipos en diferentes condiciones legaría afectar negativamente su rango de temperatura y estabilidad. Adicional se puede incurrir en peligros para el operario. (Acequilabs, 2018)

Para utilizar la mufla adecuadamente debe tener en cuenta:

- La seguridad de emplear indumentaria necesaria de protección.
- Constatar la conexión a la fuente de alimentación.
- Verificar las muestras que desea procesar.
- Calibrar la temperatura de trabajo.

Con el fin de evitar quemaduras, no ubicarse delante de la mufla sin ninguna protección térmica, use guantes, delantal y demás protección necesaria. Recuerda que siempre debe cumplir a las normas de seguridad implementadas en el laboratorio que ya están establecidas. (Acequilabs, 2018).

2.2.4 Cuidados y Precauciones de la Mufla de Laboratorio

Según (Acequilabs, 2018) este tipo de equipos requiere de los siguientes procedimientos:

- Se debe realizar una limpieza externa al menos una vez a la semana. Esta limpieza se debe hacer con un paño húmedo con algún tipo de solución no abrasiva apta para superficies metálicas.
- Revise periódicamente las conexiones eléctricas del laboratorio
- No utilice multi-tomas para conectar la mufla, no se deben utilizar conexiones que pueden sobrecalentarse.
- Deje por lo menos 15 cm de espacio alrededor de la mufla. Esto con el fin de permitir que el calor de la mufla pueda circular y salir por medio de las rejillas de ventilación del equipo.
- Haga calibración de la mufla una vez al año para corregir desfases de temperatura por el uso cotidiano.

2.3 Tratamientos Térmicos en Metales

(Hornos Industriales Ltda., 2018) detalla que:

Los tratamientos térmicos son procesos para realizar cambios en las propiedades de los aceros como la resistencia, dureza, ductilidad y otras propiedades

de los metales. Los tratamientos térmicos están basados en procesos de calentamiento y enfriamiento para provocar variación en la estructura de un material. En ciertos casos el tratamiento térmico es aplicado, antes del proceso de formado, por ejemplo, para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente. En otros casos, se usa el tratamiento térmico para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación que ocurre durante el formado y poder destinarla a una deformación posterior. Y finalmente, el tratamiento térmico puede realizarse durante o casi al finalizarla secuencia de manufactura para lograr la resistencia y dureza requeridas en el producto según las necesidades que se requieran.

2.4 Propiedades Mecánicas de los Materiales

Las cualidades mecánicas de un material varían de acuerdo a su composición química como de la estructura cristalina que posee. Los tratamientos térmicos cambian la estructura cristalina sin variar la composición química, haciendo que los materiales tengan características mecánicas concretas, a través de un proceso de calentamientos y enfriamientos secuenciales hasta obtener la estructura cristalina deseada. Entre estas características están:

- **Resistencia al desgaste:**

Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.

- **Tenacidad:**

Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).

- **Maquinabilidad:** Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.
- **Dureza:** Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades Brinell (HB) o unidades Rockwel (HRC), mediante el test del mismo nombre. (Carranza Garcia, 2011)

2.5 Etapas en los Tratamientos Térmicos

Según (Belzunce, 2001) cualquier tratamiento térmico consta al menos de tres etapas: calentamiento, mantenimiento a temperatura constante y enfriamiento.

2.5.1 Calentamiento

En esta etapa al calentar el acero en el interior de un horno apropiado, el calor se transmite desde la atmósfera del horno hacia el interior de la pieza a través de la superficie de la misma, de manera que en un instante cualquiera detectaríamos la existencia de un gradiente térmico a lo largo de su diámetro: las regiones superficiales estarán más calientes y las interiores más frías. Estos gradientes se pueden disminuir o eliminar si se utilizan velocidades de calentamiento muy lentas o bien cuando se tratan piezas muy pequeñas. La dilatación térmica diferencial introducida, aparecerán unas tensiones internas.

Figura 4.

Placa de acero sometidas a calentamiento.



Nota. En la fotografía se aprecia como una barra de metal es sometida a altas temperaturas para su tratamiento térmico. Tomado de (REDISYT, 2017).

La magnitud de las dilataciones diferenciales (y en consecuencia de las tensiones internas) se harán más notables si el acero durante el calentamiento sufre cambios estructurales. En una austenización o transformación de las estructuras ferrito-perlíticas en austenita tiene lugar con una disminución de volumen, provocando una contracción de la parte periférica cuando el núcleo de la pieza, más frío, se está expandiendo a consecuencia del calentamiento, y posterior, cuando se logra una temperatura para la que tiene lugar la transformación austenítica del núcleo, éste se contrae cuando la periferia de la pieza se sigue calentando y, en consecuencia, se está expandiendo.

Para minimizar las tensiones internas en la fase de calentamiento, es indispensable que la duración del calentamiento de un cuerpo redondo desde temperatura ambiente hasta la temperatura de austenización sea igual al diámetro del

redondo en pulgadas dividido por dos. Si consideramos el diámetro en mm, las horas que durara el calentamiento resultan de dividir el diámetro del cuerpo por 50.

Si el cuerpo a tratar es de superficie brillante y no rugosa, la transmisión de calor hacia el interior de la misma será más lenta y sería necesario habría que se duplique o triplique la duración del calentamiento. También hay que aumentar también la duración del calentamiento cuando se quisiera tratar un acero muy aleado cuya conductividad térmica puede ser mucho menor que la de un acero al carbono (Pozo, 2018).

2.5.2 *Mantenimiento a temperatura constante*

El tiempo de exposición a alta temperatura debe ser el suficiente para conseguir homogenizar la temperatura en toda la pieza, también para lograr la máxima uniformidad estructural posible. En los aceros de uso más frecuente es recomendable mantener la temperatura una hora por cada pulgada de diámetro de la pieza a tratar, siempre y cuando se haya calentado según lo establecido en tablas y cálculos pertinentes (Pozo, 2018).

2.5.3 *Enfriamiento*

La etapa de enfriamiento es importante y la que diferencia los tratamientos térmicos más empleados y es estrictamente necesaria para lograr las microestructuras finales objetivo de cada tratamiento. También en esta etapa se producen las tensiones residuales más importantes, como es el caso del tratamiento de temple. En esta etapa se corre el riesgo de producir altas tensiones residuales; estas disminuyen cuanto más pequeña es la pieza a tratar, por consecuencia del gradiente térmico que existe a lo largo de su diámetro que es menor.

2.6 Tipos de Tratamientos Térmicos

Según (Pozo, 2018) los tratamientos térmicos adquieren gran importancia en la industria en general, debido a las constantes innovaciones que requieren los metales para generar mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

- Temple
- Revenido
- Recocido
- Normalizado

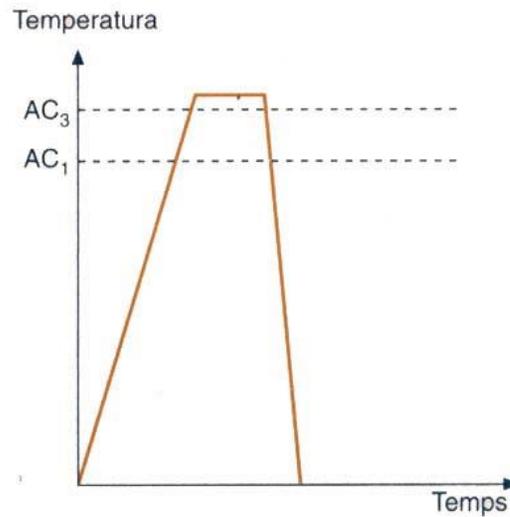
2.6.1 *Temple*

Este tratamiento térmico se caracteriza por enfriamientos rápidos (continuos o escalonados) en un medio adecuado: agua, aceite o aire, para transformar la austenita en martensita. Mediante el temple se consigue:

- Aumenta la dureza y la resistencia mecánica.
- Baja la tenacidad (aumento de la fragilidad).
- Disminuye el alargamiento unitario.
- Cambia propiedades eléctricas, magnéticas y químicas.

Figura 5.

Grafica representativa del temple, temperatura en función del tiempo.



Nota. La grafica muestra como el proceso de temple se caracteriza por su enfriamiento rápido.

Tomado de (Vega, 2016)

El temple se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- a) **Calentamiento del metal.** - Se realiza en horno, siendo lento hasta los 500°C y rápido hasta la temperatura de temple.
- b) **Homogeneización de la temperatura.** - Se mantiene a la temperatura de temple durante un determinado tiempo a la pieza para que se homogenice en todo el volumen de la pieza a templar. Este tiempo se estima experimentalmente para cada pieza, aunque se puede calcular aproximadamente.
- c) **Enfriamiento rápido.** - Se saca la pieza del horno y se enfría el material en un fluido denominado medio de temple a una velocidad superior a la crítica de temple

con objeto de obtener una estructura martensítica, y así mejorar la dureza y resistencia del acero. El medio de temple puede ser:

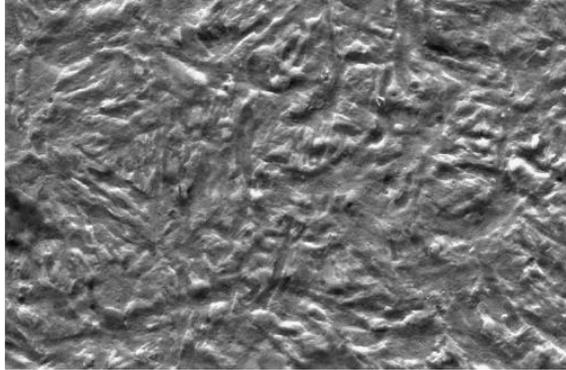
- a) **Agua:** es el medio más económico y antiguo. Se consiguen buenos temple con aceros al carbono. Las piezas se agitan dentro del agua para eliminar las burbujas de gas.
- b) **Aceite:** enfría más lentamente que el agua.
- c) **Aire:** se enfrían las piezas con corrientes de aire. Se utiliza para los denominadas aceros rápidos.

A la hora de realizar un temple, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- El tamaño de la pieza, cuanto más espesor tenga la pieza habrá que aumentar el tiempo de duración del proceso de calentamiento y de enfriamiento.
- La composición química del acero, ya que en general, los aceros aleados son de más fácil templabilidad.
- El tamaño del grano influye principalmente en la velocidad crítica del temple, teniendo más templabilidad el de grano grueso.
- El medio de enfriamiento, es el más adecuado para templar un acero el que consiga una velocidad de temple ligeramente superior a la crítica.

Figura 6.

Microestructura de acero templado.



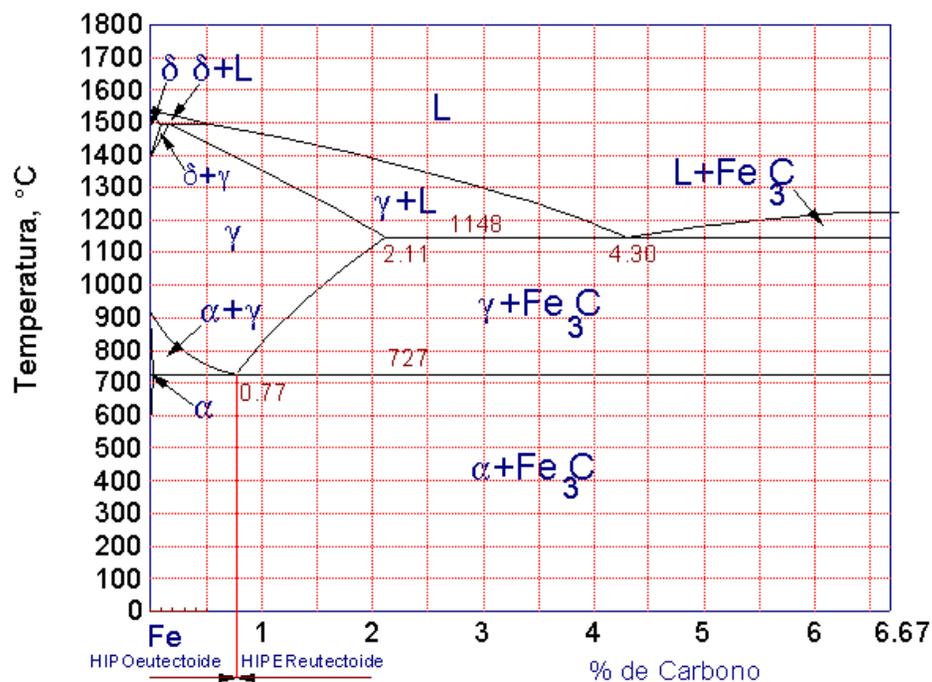
Nota. El temple consiste básicamente en la transformación del estado del acero llamado austenita al estado martensita. Tomado de (Cismatucab, 2020).

2.6.1.1 Diagrama Fe-C

De acuerdo al contenido de carbono se divide el diagrama de hierro-carbono figura 6 en dos partes: una que muestra las aleaciones con menos del 2 % de carbono y que se llaman aceros, y otra por las aleaciones con más de un 2 % de carbono, las cuales se llaman fundiciones. La parte llamada de los aceros se subdivide en otras dos: una formada por los aceros cuyo contenido en carbono es inferior al correspondiente a la composición eutéctica (0,77 %C) los cuales se llaman aceros hipoeutécticos, y la otra compuesta por los aceros cuyo contenido se encuentra entre 0,77 y 2 %, y que se conocen por aceros hipereutécticos (Derematerialia, 2020).

Figura 7.

Diagrama Fe-C.



Nota. El diagrama muestra las regiones específicas y como se clasifican los aceros de acuerdo a su composición (Derematerialia, 2020).

2.6.1.2 Tipos de Temple

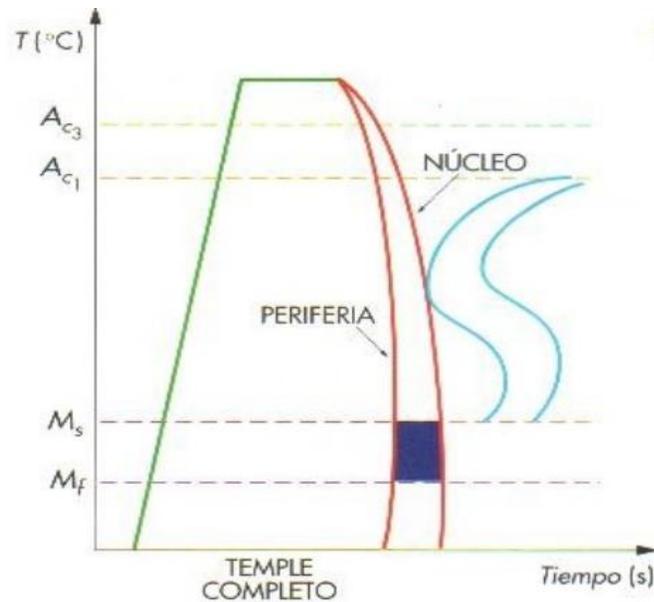
Según (Pozo, 2018) los tipos de temple son:

a) *Temple continuo de austenización completa.*

Se aplica a los aceros hipoeutectoides. Se calienta el material a 50°C por encima de la temperatura crítica superior A3, enfriándose en el medio adecuado para obtener martensita figura 7.

Figura 8.

Diagrama T-s del temple continuo.



Nota. En esta grafica se logra apreciar el enfriamiento a una temperatura superior a la crítica.

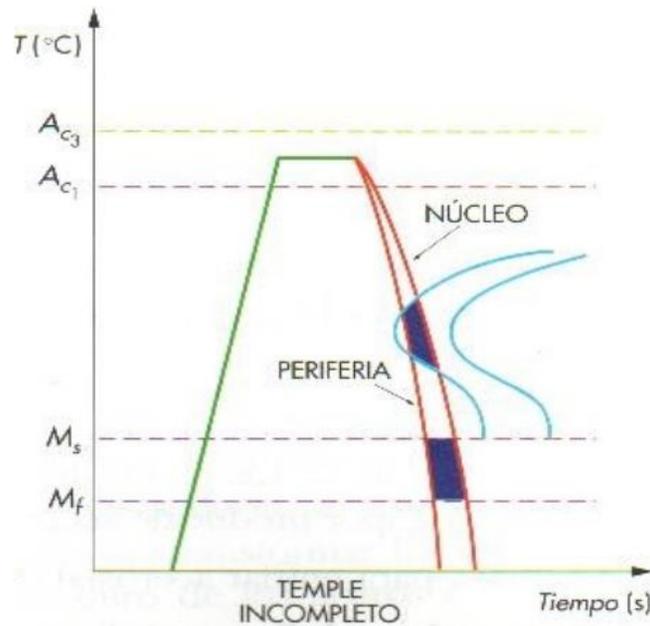
Tomado de (Instituto Tecnológico de Sonora, 2013)

b) Temple continuo de austenización incompleta.

Se aplica a los aceros hipereutectoides. Se calienta el material hasta $A_{c1} + 50^\circ\text{C}$, transformando la perlita en austenita y dejando el cementita intacto. Se enfría a temperatura superior a la crítica, con lo que la estructura resultante es de martensita y cementita figura 9.

Figura 9.

Diagrama T-s de austenización incompleta.



Nota. En esta grafica se logra apreciar el enfriamiento a una temperatura superior a la crítica al igual que el temple continuo. Tomado de (Instituto Tecnológico de Sonora, 2013).

c) *Temple superficial.*

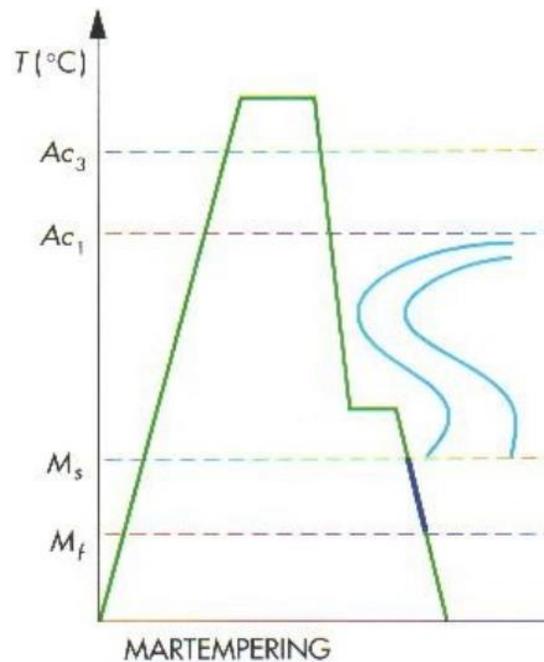
El núcleo de la pieza permanece inalterable, blando y con buena tenacidad, y la superficie se transforma en dura y resistente al rozamiento. Con el temple superficial se consigue que solamente la zona más exterior se transforme en martensita, y para ello el tiempo durante el que se mantiene el calentamiento debe ser el adecuado para que solamente un reducido espesor de acero se transforme en austenita.

d) Temple Escalonado (Martempering).

consiste en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para que se transforme completamente en austenita. Posteriormente se enfría en un baño de sales bruscamente hasta una temperatura próxima pero superior a M_s , con el fin de homogeneizar la temperatura en toda la masa y se acaba reduciendo la temperatura para que toda la pieza se transforme en martensita.

Figura 10.

Diagrama T-s del temple escalonado.



Nota. Es utilizado en aceros donde por su forma irregular no aceptan el temple completo y es de enfriamiento brusco. Tomado de (Instituto Tecnológico de Sonora, 2013).

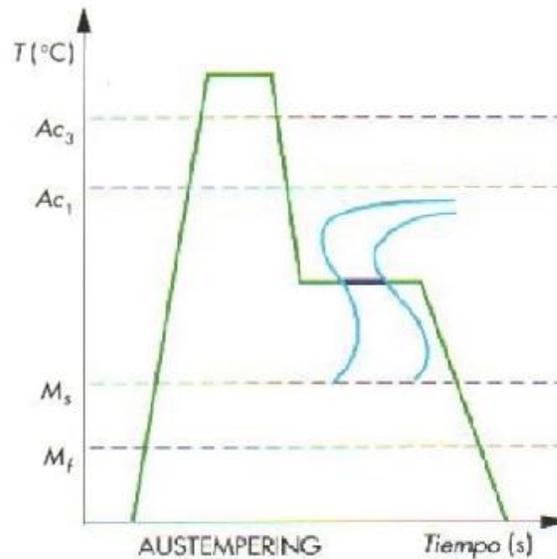
e) Temple isotérmico (Austempering).

consiste en calentar el acero a temperatura de austenización y mantenerlo el tiempo necesario para obtener austenita. Posteriormente se enfría bruscamente en un

baño de sales hasta una temperatura determinada, para igualar la temperatura en toda la masa y luego se vuelve a disminuir la temperatura para que toda la pieza se transforme en bainita.

Figura 11.

Diagrama T-s del temple isotérmico.



Nota. La grafica representa el enfriamiento aplicado aceros que no acepten temple continuo. Tomado de (Instituto Tecnológico de Sonora, 2013).

2.6.2 Recocido

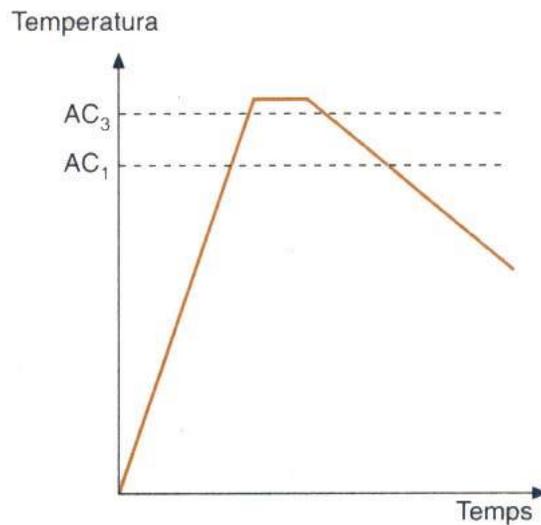
Se trata de calentar el metal hasta una determinada temperatura y enfriarlo después muy lentamente (incluso en el horno donde se calentó). De esta forma se obtienen estructuras de equilibrio. Son generalmente tratamientos iniciales mediante los cuales se ablanda el acero (Pozo, 2018).

Su finalidad es suprimir los defectos del temple. Mediante el recocido se consigue:

- Aumentar la plasticidad, ductilidad y tenacidad.
- Eliminar la acritud.
- Afinar el grano y homogeneizar la estructura.

Figura 12.

Grafica representativa del recocido temperatura en función del tiempo.



Nota. La grafica muestra como el proceso de recocido se caracteriza por su enfriamiento más controlado y sin tanta rapidez. Tomado de (Vega, 2016)

Es tratamiento térmico muy utilizado y según las temperaturas que se alcanzan en el proceso se pueden distinguir los siguientes tipos:

- ✓ **Recocido completo.** - afina el grano cuando ha crecido producto de un mal tratamiento. Se realiza en aceros hipoeutectoides.

- ✓ **Recocido incompleto.** - elimina tensiones, pero sólo recristaliza la perlita. Es más económico que el anterior.
- ✓ **Recocido de globalización.** - mejora la mecanización en los aceros.
- ✓ **Recocido de recristalización.** - reduce tensiones y elimina la acritud.
- ✓ **Recocido de homogenización.** - elimina la segregación química y cristalina. Se obtiene grano grueso por lo que es necesario un recocido completo posterior.

Figura 13.

Microestructura del acero sometido a recocido.



Nota. La figura muestra cómo termina el acero después de que se aplica el tratamiento térmico del recocido. Tomado de (Campillo, 2009)

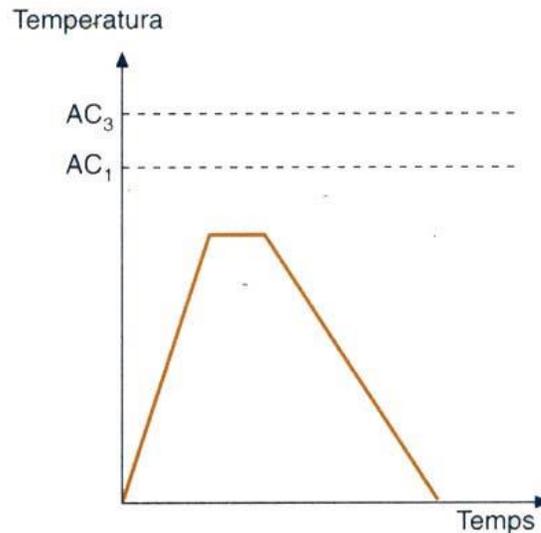
2.6.3 Revenido

Como ya se ha visto, el temple produce un aumento de la fragilidad debido a las tensiones internas que se generan al producirse la transformación martensítica. Para evitarlo, se somete el metal a un proceso de revenido, que consiste en elevar la temperatura hasta una inferior a la de transformación (punto crítico AC1) para transformar la martensita en formas más estables. Mediante el revenido se consigue:

- Disminuir la resistencia mecánica y la dureza.
- Aumentar la plasticidad y la tenacidad.

Figura 14.

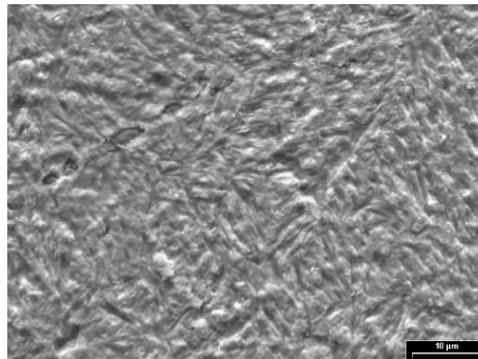
Grafica representativa del revenido temperatura en función del tiempo.



Nota. La grafica muestra como el proceso de revenido se caracteriza por no alcanzar temperaturas tan altas y de un enfriamiento controlado. Tomado de (Vega, 2016) .

Figura 15.

Microestructura del acero sometido a revenido.



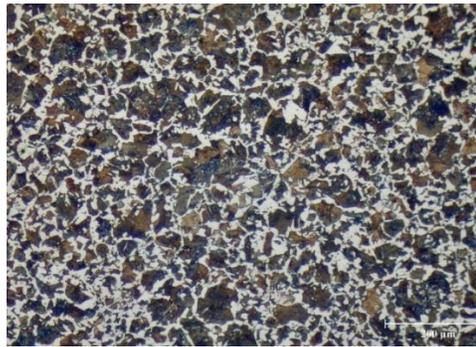
Nota. La figura muestra como ha quedado el acero después del proceso de tratamiento de revenido durante 10 minutos. Tomado de (Campillo, 2009).

2.6.4 Normalizado

Se trata de calentar el metal hasta su austenización y posteriormente dejarlo enfriar al aire. La ventaja frente al recocido es que se obtiene una estructura granular más fina y una mayor resistencia mecánica. La desventaja es que la dureza obtenida es mayor.

Figura 16.

Microestructura del acero sometido a la normalización.



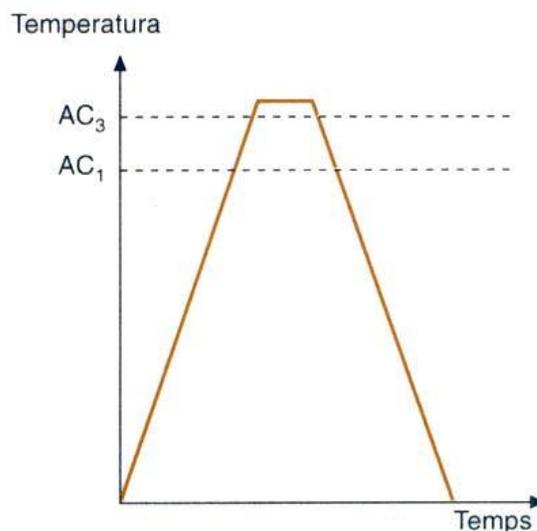
Nota. La imagen muestra la estructura microscópica del acero sometido a la normalización que se basa en el enfriamiento al ambiente. Tomado de (Derematerialia, 2020).

Mediante este proceso se consigue:

- Subsanan defectos de las operaciones anteriores de la elaboración en caliente (colada, forja, laminación) eliminando las posibles tensiones internas.
- Preparar la estructura para las operaciones tecnológicas siguientes (por ejemplo, mecanizado o temple).
- El normalizado se utiliza como tratamiento previo al temple y al revenido, aunque en ocasiones puede ser un tratamiento térmico final.

Figura 17.

Grafica representativa de la normalización T-s.



Nota. La grafica muestra como el proceso de normalizado donde los tiempos de calentamiento y enfriamiento son similares sin ser forzados. Tomado de (Vega, 2016).

2.7 Importancia y ventajas de los tratamientos térmicos

En todo negocio es imprescindible garantizar la calidad, el rendimiento y la resistencia mecánica de la maquinaria utilizada. Y ello se logra mediante los tratamientos térmicos que abarcan éstas y otras ventajas como:

- El aumento de las prestaciones a largo plazo de las piezas mecánicas de acuerdo a las necesidades de su aplicación.
- Ahorro de tiempo y dinero.
- Incremento del ciclo de vida del componente.
- Resistencia mecánica y rendimiento del producto gracias a la dureza obtenida en el tratamiento lo cual provee la capacidad de resistir al esfuerzo de tracción.
- ✓ Reducción del desgaste.

- ✓ Aumento de la conformabilidad y ductilidad del material.
- ✓ Mejor comportamiento que una pieza sin tratamiento térmico.

2.8 Termodinámica

Se denomina termodinámica a la parte de la física que se encarga de estudiar los fenómenos causados por el calor. Se enfoca principalmente de las propiedades macroscópicas de la materia, de las formas de energía, haciendo énfasis en la temperatura.

Tabla 1.

Aplicaciones de los tratamientos térmicos en aceros.

Aplicaciones para los metales tratados térmicamente	Acero adecuado	Propiedades mecánicas
Brocas, machos, herramientas de torno, pernos, tuercas escariadores, cortapapeles, limas.	Alto contenido de carbono (> 0.9% de carbono)	Máxima dureza y una elevada resistencia al desgaste
Herramientas para cortar madera, terrajas, cuchillos, instrumentos de cirugía, fresas.	Alto contenido de carbono (> 0.9% de carbono)	Alta dureza, con una tenacidad mayor que la anterior
Granetes, cinceles, caras de martillo, cuchillas de cizallas, destornilladores, ejes, engranajes.	Alto contenido de carbono (de 0.7-0.8% de Carbono)	Alta dureza, resistencia combinado con una tenacidad regular
Ejes, pasadores de herramientas	Alto contenido de carbono (de 0.7-0.8% de Carbono)	Alta resistencia y límite de fluencia, con una tenacidad mayor que la anterior
Resortes helicoidales, semi-elípticos.	Mediano-alto contenido de carbono (de 0.5 a 0.7 % de carbono)	Máxima fluencia, y con tenacidad media

Nota. Los tratamientos térmicos de los metales son específicos de acuerdo a su conformación por lo que las temperaturas y tiempos son variables.

La termodinámica estudia sistemas en equilibrio. Esto significa que as distintas propiedades a considerar en un sistema, como por ejemplo la presión, el volumen, la masa, permanecen constantes. Es importante para comprender la termodinámica saber de sus leyes: la ley cero de la termodinámica o de equilibrio térmico, la primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía, la segunda ley de la termodinámica relativa al trabajo y al calor y la tercera ley de la termodinámica acerca de la imposibilidad de llegar al cero absoluto. (Definición MX, 2014).

2.8.1 Primera Ley de la Termodinámica

Según (Definición MX, 2014) la primera Ley de la termodinámica se fundamenta en que la energía no puede crearse ni destruirse, solo puede transformarse; así, el calor es una forma de energía que puede transformarse en trabajo mecánico.

El cambio de la energía interna de un sistema termodinámico cerrado es igual a la diferencia entre la cantidad de calor y la cantidad de trabajo intercambiados por el sistema con sus alrededores como muestra la ecuación 1 (Ball, 2005).

$$U = Q - W \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

ΔU : variación de la energía interna del [J]

Q : calor [J]

W : trabajo [J]

2.8.2 Segunda Ley de la Termodinámica

Según (Definición MX, 2014) la segunda ley de la termodinámica se basa en que solo es posible la realización de un trabajo por el paso del calor de un cuerpo con menor temperatura a uno de mayor temperatura; esta ley también explica el por qué existe una parte de la energía que no puede convertirse en trabajo.

2.9 Transferencia de Calor

El calor es considerado energía que se transfiere de un sistema a otro por efecto de una diferencia en la temperatura. La transferencia de energía se produce desde el medio que tiene la temperatura más elevada hacia el medio de temperatura más baja hasta que los dos llegan a un punto de equilibrio térmico.

Es indispensable para que exista una transferencia de calor, contar con la presencia de diferentes temperaturas, la diferencia de temperatura es la causante para la transferencia de calor. No hay transferencia neta de calor entre dos medios que están a una misma temperatura. Cuanto más grande es la diferencia entre temperaturas, mayor es la tasa de transferencia de calor (Çengel & Ghajar, 2011).

Según (Çengel & Ghajar, 2011) el calor puede ser transmitido de tres formas distintas: por conducción, por convección o por radiación.

2.9.1 Conducción

La conducción es la transferencia de energía desde las partículas con más energía hacia las adyacentes de menos energía de una sustancia, como consecuencia de sus interacciones. Este fenómeno ocurre en sólidos, líquidos o gases, aunque en líquidos y gases solo se da la conducción pura si no se toma en cuenta la posibilidad de convección.

La tasa de conducción de calor a través de una capa de espesor constante, es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área normal a la dirección de transferencia de calor y es inversamente proporcional al espesor de la capa, como se expresa en la ecuación 2 (Çengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta e} = -kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta e} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

\dot{Q}_{cond} : tasa de conducción de calor [W]

k : conductividad térmica $\left[\frac{W}{m K} \right]$

A : área [m²]

ΔT : diferencia de temperatura [K]

e : espesor [m]

En el caso límite cuando $\Delta e \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial, como se muestra en la ecuación 3, conocida como la ley de Fourier de conducción de calor (Çengel & Ghajar, 2011).

$$\Delta \dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{de} \quad \text{Ecuación (3)}$$

2.9.2 Conductividad Térmica

“Es una característica de cada material y expresa la medida de su capacidad para conducir calor, por lo tanto, es el cociente de la densidad del flujo térmico y el gradiente de temperatura $\left(\frac{W}{m K} \right)$. Este coeficiente varía según ciertas condiciones que

presente el material como la humedad que contiene o la temperatura a la que se realiza la medición” (Çengel & Boles, Termodinamica , 2009).

“Si se presenta un valor elevado de conductividad térmica esto indica que el material es un buen conductor del calor, por otra parte, si presenta un valor bajo, esto indica que el material es un mal conductor o que es un aislante” (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011).

2.9.3 Convección

“Es la forma de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento, comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La tasa de transferencia de calor por convección se determina a partir de la Ley de enfriamiento de Newton”, como se expresa en la ecuación 4 (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011).

$$\dot{Q}_{conv}=hA(T_s-T_f) \qquad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : tasa de transferencia de calor por convección [W]

h : coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

A : área superficial en la cual tiene lugar la transferencia de calor [m²]

T_s : temperatura de la superficie [K]

T_f : temperatura del fluido lejos de la superficie [K]

2.9.4 Radiación

Es la cantidad de energía que emite un cuerpo en forma de fotones o de ondas electromagnéticas, como consecuencias se dan cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

En esta situación no existe contacto entre los cuerpos ni fluidos para que se de transporte de calor. Por ejemplo, de un cuerpo A en estado sólido o líquido de temperatura mayor en comparación al cuerpo B, existirá una transferencia de calor por radiación desde A hacia B.

Para evidenciar este fenómeno es necesario que un cuerpo tenga una temperatura bastante elevada debido a que la transferencia térmica en este caso depende de la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia.

La tasa máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura absoluta se determina mediante la ley de Stefan-Boltzmann, expresada mediante la ecuación 5 (Çengel & Boles, Termodinamica , 2009).

$$\dot{Q}_{\text{emitida, máx}} = \sigma A T_s^4 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

$\dot{Q}_{\text{emitida, máx}}$: tasa máxima de radiación [W]

σ : constante de Stefan-Boltzmann $\approx 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

A: área superficial [m^2]

T_s : temperatura absoluta [K]

“La superficie idealizada que emite radiación a la tasa máxima se llama cuerpo negro y la radiación que éste emite se llama radiación de cuerpo negro.

La radiación emitida por todas las superficies reales es menor a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura” y se expresa de la forma mostrada en la ecuación 6 (Çengel & Boles, Termodinamica , 2009).

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

$\dot{Q}_{emitida}$: tasa de radiación emitida por superficies reales [W]

ϵ : emisividad de la superficie

“La emisividad es un valor adimensional comprendido entre 0 y 1; este valor es la medida de qué tanto se aproxima una superficie a un cuerpo negro, para el cual la emisividad es 1.

Otra propiedad importante de la radiación es la absorbanza, α , que es la fracción de energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta.

Al igual que la emisividad su valor está comprendido entre 0 y 1, siendo 1 el valor de un cuerpo negro, el cual absorbe toda la radiación que incide sobre él.

La ley de Kirchhoff de la radiación establece que la emisividad y la absorbanza de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas, son iguales”. La tasa a la que una superficie absorbe radiación está determinada por la ecuación 7 (Çengel & Boles, Termodinamica , 2009).

$$\dot{Q}_{absorvido} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

$\dot{Q}_{incidente}$: tasa a la que la radiación incide sobre la superficie [W]

α : absorbancia de la superficie

“La diferencia entre las tasas de radiación emitida por la superficie y de radiación absorbida por la misma es la transferencia neta de calor por radiación.

Cuando una superficie relativamente pequeña de emisividad ε y área superficial A , a temperatura superficial T_s , está encerrada por completo por una superficie mucho más grande (o negra) a temperatura termodinámica $T_{alrededores}$ y separada por un gas que puede ser el aire, que no interfiere con la radiación”, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se determina a partir de la ecuación 8 (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011).

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{alrededores}^4) \quad \text{Ecuación (8)}$$

“Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. En general, la determinación de la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación” (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011).

CAPITULO III

3. IMPLEMENTACIÓN

3.1 Consideraciones Generales

Para implementación del horno mufla hay que tomar en cuenta el trabajo que va a realizar, como el rango máximo de temperatura que permite la selección de materiales refractarios que se ajusten y se desempeñen sin presentar contratiempos, y considerando la seguridad que brinden en conjunto; además el control del proceso.

Como materiales principales para la conservación del flujo de calor dentro de la cámara interna del horno se considera la adquisición de ladrillo refractario, fibra cerámica y mortero refractario; materiales suficientes para conservar las altas temperaturas dentro del horno y una temperatura mínima o dentro del rango normal en la superficie exterior del horno.

El material para generar el calor suficiente dentro de la cámara interior del horno son resistencias eléctricas que deberán cumplir con el propósito de alcanzar elevadas temperaturas durante tiempos determinados, estas deben ser de una aleación que permita lo mencionado y tenga una larga vida útil.

Hay que considerar que para el control de la temperatura se colocara un sensor preciso que soporte el choque térmico al trabajar el horno.

Como pieza fundamental hay que tomar en cuenta el controlador de temperatura el cual brinde la facilidad de programación para facilitar el trabajo del operario.

3.2 Selección del Material

Para la selección de los materiales que conformaran el horno mufla se consideraron materiales que se ajusten a los parámetros expuestos en el alcance del proyecto donde se detalla el voltaje de trabajo, las dimensiones de la cámara interna del horno y la temperatura máxima.

Tabla 2.

Aislantes térmicos.

MATERIAL	ESPECIFICACIONES TECNICAS	VENTAJAS
FIBRA CERAMICA	Color blanco Espesor 25mm Uso continuo 1100°C Límite de uso 1260°C Punto de fusión 1760°C Largo 7620mm Ancho 610mm	Conductividad térmica baja y Baja energía térmica almacenada. Gran resistencia a los choques térmicos Importantes de protección contra fuego. Gran flexibilidad, facilita cortes e instalación. Calienta y enfría rápidamente Buena resistencia mecánica. (Manta Kaowool)
PYROGEL XT-E	Espesor 5mm Temperatura máxima 650°C Color marrón Densidad 12.5 lb/pie3	Conductividad térmica muy baja Materiales aislantes más eficientes del mundo Bajo tiempo y esfuerzo para la instalación Ecológico. (AEROGEL)

MATERIAL	ESPECIFICACIONES TECNICAS	VENTAJAS
LAMINA RIGIDA DE FIBRA MINERAL	Temperatura máxima 1038°C	Máxima eficiencia térmica
	Espesor 25,4mm	No favorecen la corrosión
	Color gris claro	Ahorro directo en el consumo de energía
	Largo 91cm Ancho 30cm	Fácil aplicación y manejo. (Uruca refractarios).

Nota. En la tabla se nota el mejor desempeño de la fibra o manta cerámica, así como más factible su adquisición.

Tabla 3.

Ladrillos refractarios.

NOMBRE	ESPECIFICACIONES TECNICAS	CARACTERISTICAS
Ladrillo refractario de alta alúmina	Medidas 9" x 4.5" x 2.5" (23 x 11.5 x 6.5 cm) Temperatura de máxima operación: 1400°C	Conductividad termal baja y buen funcionamiento del aislamiento (Samothermal)
Ladrillo refractario de alta alúmina 80%	Medidas 12" x 3" x 6" Temperatura de máxima operación: 1800°C	Resistente a la acción de fundentes, baja porosidad, buena resistencia a cambios térmicos, gran resistencia y rigidez a elevadas temperaturas. (FRISAC - PERU)
Ladrillo refractario	medidas 5x10x20 cm. Temperatura de máxima operación: 800°C	Ideal para la construcción de hornos para pizzerías, panaderías, industriales y caseros, además para usar en fundición de vidrios, secadores de cacao y arroz, y más usos. (Ladrillera Nacional)

Nota. En esta tabla de ladrillos refractarios se nota el mejor desempeño del ladrillo de alta alúmina, el cual satisface la necesidad del proyecto a implementar.

Tabla 4.*Mortero refractario.*

NOMBRE	ESPECIFICACIONES TECNICAS	CARACTERISTICAS
KAST-O-LITE ® 16 PLUS	Temperatura de operación: 871.1°C	máxima Excepcional baja densidad y muy baja conductividad térmica. (J.J. Medina Soluciones Industriales)
SUPER CASTABLE FORTE	Temperatura de operación: 1485°C	máxima Concreto refractario formado a base de granos calcinados de arcilla de clase súper refractaria, mezclados con cemento aluminato de calcio. (FRISAC - PERU)
AEROFRAX	Temperatura de operación: 1500°C	máxima Mortero refractario silicio- aluminoso húmedo de fraguado al aire para usar en mamposterías refractarias. (Importadora MINASUR)

Nota. En referencia a la tabla de morteros refractarios donde destaca el de tipo AEROFRAX el cual se acopla a la utilización con materiales refractarios anteriormente elegidos.

De acuerdo a la tabla 3 donde se detallan las características de los aislantes refractarios se selecciona la fibra cerámica la cual posee las cualidades aislantes necesarias en la construcción del horno además se considera que la temperatura a la que estará expuesta no sobrepasa el límite que establece debido que estará recibiendo el ladrillo refractario.

En la siguiente tabla 4 correspondiente a los ladrillos refractarios se toma en cuenta para la construcción el ladrillo refractario de alta alúmina importado y comercializado por la empresa SAMOTHERMAL el cual guarda características en su constitución de Silicio y alta Alúmina en porcentajes que lo hacen óptimo para el proyecto, maneja una temperatura máxima de trabajo de 1400 °C; al estar en exposición

directa con la temperatura del horno que se considera alcanza los 1000 °C lo hace el material óptimo, considerando que por seguridad se elige un material de mayor resistencia al calor.

Para complementar la construcción y el aislamiento del horno, en la tabla 5 se elige trabajar con el mortero refractario AEROFRAX el cual presenta características ideales para la unión de los ladrillos refractarios y la constitución de una capa que cubra la superficie de la estructura creada por los ladrillos para sellar posibles fugas del calor generado en el interior del horno.

3.2.1 Resistencias de Kanthal A1

Las resistencias empleadas en el horno mufla están constituidas del material llamado KANTHAL 1 ideal para el trabajo de generación de calor.

Figura 18.

Alambre Kanthal.



Nota. El alambre de FeCrAl (hierro/ cromo/aluminio) de nombre comercial Kanthal A1.

El alambre kanthal A1 es la calidad más elevada de las aleaciones de FeCrAl (hierro/ cromo/aluminio) de Kanthal, puede trabajar hasta una temperatura de elemento de 1400 °C y es utilizado principalmente en la fabricación de resistencias eléctricas para todo tipo de hornos eléctricos y sin ninguna duda es el mejor material del mundo para esta aplicación. La vida útil del Kanthal A1 es considerablemente mejor en comparación con cualquier otro material que realizan similares trabajos.

Tabla 5.

Características de aleaciones de base Fe-Cr-Al.

Composición química		KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D
Fe	%	70	70	72	73
Cr	%	22	22	22	22
Al	%	5.8	5.8	5.3	4.8
Densidad	kg/m ³	7100	7100	7150	7250
Temperatura de fusión	°C	1500	1500	1500	1500
Temperatura máxima de utilización	°C	1425	1400	1300	1300
Calor específico a 20 °C	kJ/kg K	0.46	0.46	0.46	0.46
Calor específico medio a 0 - 1 000 °C	kJ/kg K	0.54	0.54	0.54	0.54
Conductividad térmica a 20 °C	W/m K	13	13	13	13

Nota. La aleación de nombre comercial Kanthal A1 es de fácil adquisición y es la mejor alternativa para hornos que alcanzan una temperatura de hasta 1200 °C. Tomado de (De La Poza, 1994).

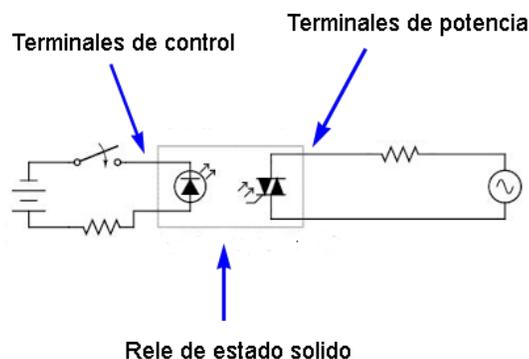
El Kanthal, se caracteriza por mantener su resistencia a la tensión cuando la temperatura aumenta y, y en comparación a otros materiales, se caracteriza por poseer un alto punto de fusión, no se oxida ni corroe fácilmente, no es magnético y cuenta con alta flexibilidad. Estas propiedades hacen a los alambres Kanthal un material predilecto para usos donde se requiere calentamiento y resistencia.

3.2.2 Relé de estado sólido

El relé de estado sólido (SSR) se utilizará para para poner en funcionamiento dispositivos eléctricos o electrónicos mediante una señal de control es este caso el dispositivo eléctrico es la resistencia que generara calor como se muestra en la figura 29.

Figura 29.

Representación gráfica del relé de estado sólido.



Nota. El relé de estado sólido brinda beneficios de unir el control con el circuito de potencia con gran precisión. Tomado de (Cinjordiz, 2016).

3.2.2.1.1 Funcionamiento de un relé de estado sólido.

En el circuito de entrada existe un LED que transforma la señal de activación en una señal luminosa, esta señal es recibida por un foto-transistor y es convertida en una

señal eléctrica. En el circuito de salida hay un circuito de disparo, quien es el encargado de activar el componente principal, que en este caso es un Triac.

El circuito de entrada se activará si se aplica un voltaje igual o superior al especificado para el SSR y se desactiva cuando este voltaje es menor.

Se estima que su vida útil en 100 millones de operaciones, en comparación a 100.000 – 200.000 operaciones estimadas para un relé electromecánico.

Figura 20.

Relé de estado sólido



Nota. El relé de estado sólido a emplearse es de 40 A capaz de soportar el dimensionamiento del sistema implementado en el proyecto.

3.2.2.1.2 Ventajas de los SSR

- Los componentes internos del SSR están protegidos por un aislamiento galvánico el que no permite que exista contacto entre ellos.
- Corriente de entrada baja.
- Alto tiempo de vida útil (por menor desgaste)
- No existen saltos de corriente o arcos eléctricos.

- Silencioso en su operación, no posee partes mecánicas móviles.
- Menor tiempo de respuesta (en el orden de los milisegundos)
- Maneja grandes corrientes de carga (hasta 100 A)

El relé de la figura 20 cuenta de las siguientes características:

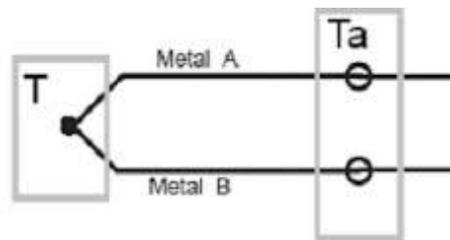
- Corriente de salida: 40A
- Voltaje de entrada: 3-32 DC
- Voltaje de salida: 24-380 AC

3.2.3 Termopar tipo K

Los termopares son sensores de temperatura. Se constituye de dos metales diferentes, que se unen en un extremo. Cuando hay variación de temperatura en el punto de la unión se genera una tensión que es proporcional a la temperatura figura 21.

Figura 21.

Representación gráfica del termopar.



Nota. La punta de unión de los dos bimetales es la parte principal del termopar es el que envía el impulso para ser traducido en la medida de temperatura por el controlador. Tomado de (Pérez, 2013).

Para la construcción del horno se ha elegido el termopar tipo k constituido de cromel (cromo y aluminio) y alumel (aluminio y níquel) los cuales realizan un trabajo de medición desde -200 grados centígrados hasta +1260 grados.

El termopar tipo K cerámicos es utilizado en aplicaciones de más altas temperatura, la imagen 12 muestra un termopar para mufla.

Figura 22.

Termopar tipo k.



Nota. Termopar de recubierta cerámica tipo K.

3.2.4 Controlador de Temperatura REX-C100

Un controlador de temperatura es un dispositivo electrónico utilizado para manejar la temperatura deseada de un medio ambiente, con este instrumento se monitorea la temperatura, y genera una orden de variación de la misma, que se hace mediante un control inalámbrico o una computadora, en ambos controles (computadora y control inalámbrico) se observa en todo momento la temperatura actual.

Los controladores de temperatura son instrumentos que compara la señal del sensor, es decir mantiene tan cerca como sea posible, el equilibrio entre la temperatura medida y la temperatura deseada.

Figura 23.

Controlador de temperatura del REX-C100.



Nota. El controlador de temperatura es quien ordena la actividad de calentamiento y estabilización de la temperatura según el requerimiento.

Las características del controlador de temperatura REX C100 de la figura 13 están dentro de la siguiente descripción:

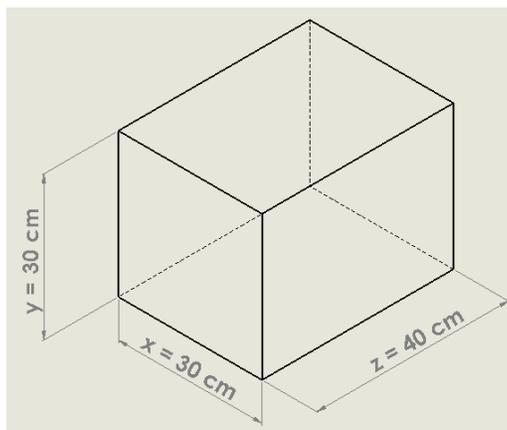
- Exactitud de medición: ± 0.5 %FS
- Resolución: 14 bits
- Ciclo de muestreo: 0.5 seg.
- Energía: AC 100-240V 50 / 60HZ
- Valor de proceso (PV), Valor de ajuste (SV)
- Salida, autoajuste puede ser indicado por:LED
- Control (incluyendo ON/OFF, paso-tipo PID y PID continuo)
- Control autoajustable
- Salida de relé: Contacta con capacidad 250V AC 3A (carga resistiva)
- Detective de temperatura rango: 0 a 1300°C
- Energía consumo < 10 VA

3.3 Cámara Interna del Horno Mufla

Las dimensiones del horno mufla se han elegido de acuerdo a propios criterios considerando las aplicaciones que desarrollara en el laboratorio de electromecánica de la universidad y teniendo en cuenta la optimización de las medidas de los ladrillos refractarios, las medidas son las que se muestran en la figura 24.

Figura 24.

Dimensiones de la cámara interna del horno.



$$x = 0.3 \text{ m}$$

$$y = 0.3 \text{ m}$$

$$z = 0.4 \text{ m}$$

Donde:

x : Ancho

y : Alto

z : Profundidad

Se procede a encontrar el volumen de la cámara interna del horno utilizando la ecuación 9.

$$V_{\text{cámara}} = x * y * z$$

Ecuación (9)

$$V_{\text{cámara}} = (0.3 * 0.3 * 0.4) \text{ m}$$

$$V_{\text{cámara}} = 0.036 \text{ m}^3$$

Según (Bóveda, 2009) el volumen máximo de una pieza a tratar en el horno no debe sobrepasar el 50 % del volumen total de la cámara interna según la ecuación 10.

$$V_{pieza} = \frac{1}{2} V_{cámara} \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$V_{pieza} = 0.5 * 0.036 \text{ m}^3$$

$$V_{pieza} = 0.018 \text{ m}^3$$

3.4 Cantidad de Calor Hacia la Carga

La cantidad total de calor suministrado por el sistema hacia la carga es igual a la suma del calor necesario para elevar la temperatura del aire más la cantidad de calor que absorbe el material a realizar el tratamiento térmico (Chapman, 1984).

$$QC = QA + Qm \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

QA : Calor debido al calentamiento del aire [W]

Qm : Calor debido al calentamiento del material para tratamiento térmico [W]

Se obtiene el valor del calor necesario para el calentamiento del aire mediante el uso de la ecuación 12 (Holman, 1986).

$$QA = mA * CpA * \Delta T \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

mA : Masa del aire [kg]

CpA : Calor específico del aire $\left[\frac{J}{kg K} \right]$

ΔT : Diferencia de temperaturas [K]

3.4.1 Cálculo de la Masa de Aire en la Cámara Interna del Horno

Para continuar con los cálculos de diseño del horno se considera valores de la tabla 6 que recopila datos del comportamiento del aire a diferentes temperaturas.

Se emplea la temperatura ambiente en la ciudad de Latacunga donde trabajara el horno mufla que mediante registros se obtiene el dato de 17 °C, la temperatura siguiente a considerar es la de 50° C que es la temperatura en la superficie externa del horno y es la recomendada para un trabajo seguro en la industria afín; y por último se considera la temperatura máxima dentro del horno que es de 1000° C.

Tabla 6.

Propiedades del aire a diferentes temperaturas.

Temperatura T , (°C)	Densidad ρ , (kg/m ³)	Calor Específico o C_p , (J/kg K)	Conductividad Térmica k , (W/m K)	Viscosidad Dinámica μ , (kgm s)	Numero de Prandtl Pr
17	1.217	1007	0.02491	1.811×10^{-5}	0.7317
50	1.092	1007	0.02735	1.963×10^{-5}	0.7228
1000	0.2772	1184	0.07868	4.826×10^{-5}	0.7260

Nota. Valores tomados de (Çengel & Cimbala, Mecanica de fluidos, 2006).

Tomando en cuenta el valor máximo de volumen permitido en el horno se procede a encontrar el valor de la masa de aire en la cámara interna con la ecuación 13 (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011).

$$m_A = \rho_A * V_A$$

Ecuación (13)

Donde:

$$\rho_A: \text{Densidad del aire a } 1000 \text{ }^\circ\text{C} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_A: \text{Volumen de aire } [\text{m}^3]$$

Con el volumen máximo anteriormente obtenido y considerando los valores de las tablas encontramos la masa de aire de acuerdo a la temperatura de 1000 °C.

$$V_A = V_{\text{cámara}} - V_{\text{pieza}}$$

Ecuación (14)

$$V_A = 0.036 \text{ m}^3 - 0.018 \text{ m}^3$$

$$V_A = 0.018 \text{ m}^3$$

$$m_A = 0.2772 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0.018 \text{ m}^3$$

$$m_A = 0.0049896 \text{ kg}$$

Se procede a calcular la diferencia de temperaturas en el interior de la cámara del horno y la temperatura ambiente ecuación 15, para proceder aplicar la ecuación 12 y encontrar la cantidad de calor producido por el calentamiento del aire dentro de la cámara interna del horno.

$$\Delta T = T_f - T_i$$

Ecuación (15)

$$\Delta T = 1273.15 \text{ K} - 290.15 \text{ K}$$

$$\Delta T = 983 \text{ K}$$

$$Q_A = m_A * C_{pA} * \Delta T$$

$$Q_A = 0.0049896 \text{ kg} * 1184 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} * 983 \text{ K}$$

$$Q_A = 5807.26 \text{ J} = 5.8 \text{ kJ}$$

3.4.2 *Calculo del Calor Necesario Para Calentar el Material a Tratarse*

Para determinar la cantidad de calor necesario para calentar un metal se toma como referencia un acero comúnmente utilizado de característica baja en carbón siendo este el acero AISI 1010 de propiedades mostradas en la tabla 7; al cual se aplica la ecuación 16 para encontrar la masa de la pieza considerando el volumen máximo que este puede ocupar dentro del horno, y por ultimo aplicamos la ecuación 17 (Holman, 1986).

$$m_{pieza} = \rho m * V_{pieza} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Tabla 7.

Propiedades del acero AISI1010.

Acero	Densidad $\rho, (\text{kg}/\text{m}^3)$	Calor especifico $C_p, (\text{J}/\text{kg K})$	Conductividad térmica $k, (\text{W}/\text{m K})$	Difusividad térmica $\alpha = (\text{m}^2/\text{s})$
AISI1010	7832	434	63.9	18.8×10^{-3}

Nota. Valores tomados de (Çengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa, 2011)

Donde:

$$\rho m: \text{Densidad del acero AISI 1010} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$m_{pieza} = 7832 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0.018 \text{ m}^3$$

$$m_{pieza} = 140.98 \text{ kg}$$

$$Q_m = m_{pieza} * C_{pm} * \Delta T \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

m_{pieza} : Masa de la pieza de acero AISI 1010 [kg]

C_{pm} : Calor específico del acero AISI 1010 $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

ΔT : Diferencia de temperaturas [K]

$$Q_m = 140.98 \text{ kg} * 434 \left[\frac{J}{kg K}\right] * 983 \text{ K}$$

$$Q_m = 60145169.56 \text{ J} = 60145.17 \text{ kJ} \text{ considerando que } 1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ kJ}$$

Para finalizar se encuentra el valor total de calor que debe ser suministrado por el sistema hacia la carga en kilovatios por hora, empleando la ecuación 11.

$$Q_c = Q_A + Q_m$$

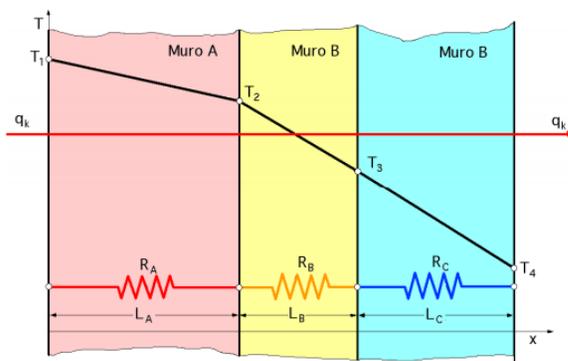
$$Q_c = 5.8 \text{ kJ} + 60145.17 \text{ kJ}$$

$$Q_c = 60150.97 \text{ kJ} \text{ considerando que } 1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ kJ}$$

$$Q_c = 16.71 \text{ kWh}$$

3.5 Estudio de la Transferencia de Calor del Horno Mufla

Para empezar con el análisis de la transferencia de calor hay que tomar en cuenta la temperatura máxima dentro del horno y la temperatura máxima externa del horno, ambas se caracterizan por ser constantes y son conocidas.

Figura 25.*Pared compuesta en serie.*

Nota. La pared está compuesta de diferentes materiales y cada uno se comporta como una resistencia en este caso al paso del calor. Tomado de (Fernandez, 1992).

Según (Fernandez, 1992) cómo se indica en la figura 15, en un sistema de tres capas, los gradientes de temperatura en éstas son distinto. El calor transmitido se puede expresar para cada sección y como es el mismo para todas las secciones.

Según (Astigarraga, 1994) se debe calcular el flujo de calor que se pierde a través de las resistencias térmicas, ecuación 18. Cada segmento o material de la pared representa una resistencia o restricción al paso normal de calor.

$$q = \frac{T_1 - T_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad \text{Ecuación (18)}$$

3.5.1 *Calculo de Pérdidas de Calor*

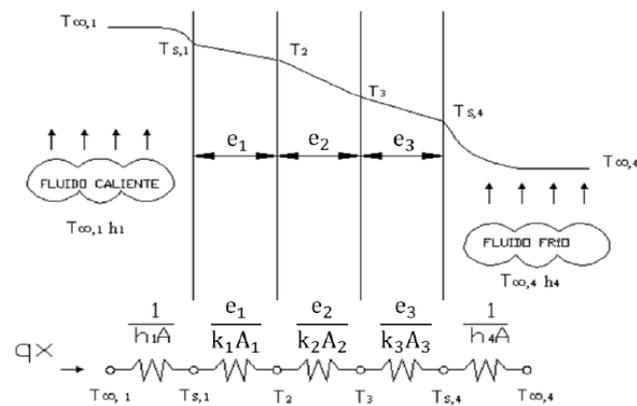
Se realiza este estudio para determinar la potencia extra que necesitara el horno, considerando que los procesos dentro del horno son a puerta cerrada y

despreciando la pérdida de calor al abrir y cerrar la puerta ya que las pérdidas de calor en ese momento son despreciables.

3.5.2 Resistencias Térmicas en las Paredes del Horno

Figura 26.

Circuito equivalente para una pared compuesta en serie.



Nota. La resistencia total es la suma de todas las resistencias o paredes que conforman el horno mufla. Tomado de (Ushiña, 2014)

Se procede a determinar los valores de las resistencias considerando los valores que se conocen de acuerdo a los datos de las características de cada uno de los materiales que forman las paredes del horno.

$$T_1 = 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \quad 1073.15 \text{ K}$$

$$T_4 = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \quad 323.15 \text{ K}$$

$$T_5 = 17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \quad 290.15 \text{ K}$$

Donde:

T_1 : Temperatura en la pared interior del horno [K]

T_4 : Temperatura en la superficie exterior del horno [K]

T_5 : Temperatura del ambiente [K]

$$e_1=0.063 \text{ m}$$

$$e_2=0.040 \text{ m}$$

$$e_3=0.003 \text{ m}$$

Donde:

e_1 : Espesor del ladrillo refractario [m]

e_2 : Espesor de la manta de fibra cerámica [m]

e_3 : Espesor de la chapa de acero [m]

$$k_1=0.23 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$k_2=0.30 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$k_3=47 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Donde:

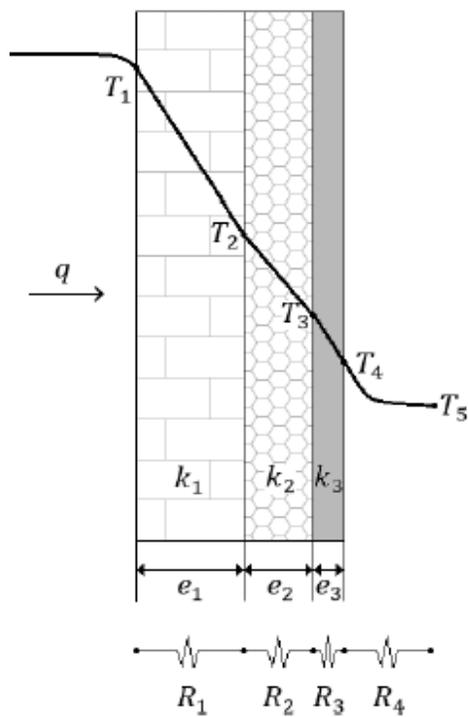
k_1 =Conductividad térmica del ladrillo refractario $\left[\frac{W}{m K} \right]$

k_2 = Conductividad térmica de la manta de fibra cerámica $\left[\frac{W}{m K} \right]$

k_3 = Conductividad térmica de la chapa de acero $\left[\frac{W}{m K} \right]$

Figura 27.

Representación de las paredes del horno.



Nota. Cada capa que constituye el horno se comporta como una resistencia de un circuito eléctrico.

Tomado de (Ushiña, 2014).

Se desprecia la resistencia de calor por radiación debido a que la temperatura en el interior del horno no llega a los parámetros mínimos para que sea considerada.

Según (Astigarraga, 1994) se encuentran las resistencias térmicas por conducción de cada material (R_1 , R_2 y R_3) con la ecuación 19.

$$R_{cond} = \frac{e}{k \cdot A} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

e : Espesor del material [m]

k : Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m K}\right]$

A : Área de transferencia de calor $[m^2]$

Según (Astigarraga, 1994) se encuentran las resistencias térmicas por convección del aire con la ecuación 20.

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

A continuación, se realiza el cálculo del área de cada material por donde ocurre la transferencia de calor

$$A = 2 \times (X \times Y + Y \times Z + Z \times X) \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$X_1 = 0.426m$$

$$X_2 = 0.506m$$

$$X_3 = 0.512m$$

$$Y_1 = 0.426m$$

$$Y_2 = 0.506m$$

$$Y_3 = 0.512m$$

$$Z_1 = 0.526m$$

$$Z_2 = 0.606m$$

$$Z_3 = 0.6012m$$

$$A_1 = 2 \cdot [(0.426 \cdot 0.426) + (0.426 \cdot 0.526) + (0.426 \cdot 0.526)] m^2$$

$$A_1 = \mathbf{1,174 m^2}$$

$$A_2 = 2 \cdot [(0.506 \cdot 0.506) + (0.506 \cdot 0.606) + (0.506 \cdot 0.606)] m^2$$

$$A_2 = \mathbf{1.739 m^2}$$

$$A_3 = 2 \cdot [(0.512 \cdot 0.512) + (0.512 \cdot 0.612) + (0.512 \cdot 0.612)] m^2$$

$$A_3 = \mathbf{1.778 m^2}$$

Se obtienen los valores de las resistencias de calor por conducción de cada una de las capas que componen las paredes del horno aplicando la ecuación 19.

$$R_{1\ cond} = \frac{e_1}{k_1 * A_1}$$

$$R_{1\ cond} = \frac{0.063m}{0.23 \frac{W}{m\ K} * 1.174m^2}$$

$$R_{1\ cond} = \mathbf{0.233} \frac{W}{K}$$

$$R_{2\ cond} = \frac{e_2}{k_2 * A_2}$$

$$R_{2\ cond} = \frac{0.040m}{0.30 \frac{W}{m\ K} * 1.739m^2}$$

$$R_{2\ cond} = \mathbf{0.077} \frac{W}{K}$$

$$R_{3\ cond} = \frac{e_3}{k_3 * A_3}$$

$$R_{3\ cond} = \frac{0.003m}{47 \frac{W}{m\ K} * 1.778m^2}$$

$$R_{3\ cond} = \mathbf{3.59 \times 10^{-5}} \frac{W}{K}$$

Se debe hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección para encontrar la resistencia por convección del aire, mediante el uso de la ecuación 22 (Holman, 1986).

$$h = \frac{Nu * k}{L}$$

Ecuación (22)

Donde:

Nu : Número de Nusselt

k : Conductividad térmica del aire [$\frac{W}{m\ K}$]

L : Longitud característica [m]

Para empezar el número de Nusselt es un valor adimensional que relaciona la transferencia de calor por conducción entre la película del fluido en contacto con la pared sólida y por convección del fluido en movimiento; se lo determina mediante la función de la ecuación 23 (Holman, 1986)

$$u=C (Gr, Pr)^m$$

Ecuación (23)

Donde:

Gr : Número de Grashof

Pr : Número de Prandtl

Para encontrar el número de Grashof, se debe desarrollar la (ecuación 24) (Holman, 1986).

$$Gr=(\Delta T*\beta) \left(\frac{L^3*\rho^2*g}{\mu^2} \right)$$

Ecuación (24)

Donde:

ΔT : Diferencia de temperatura entre la superficie exterior del horno y la media del ambiente [K]

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica [K^{-1}]

L : Longitud característica [m]

ρ : Densidad del aire [$\frac{kg}{m^3}$]

g : Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

μ : Viscosidad absoluta [$\frac{kg}{m s}$]

$$\Delta T=T_4-T_5$$

$$\Delta T=323.15 K-290.15 K$$

$$\Delta T = 33 \text{ K}$$

Se determina el coeficiente de expansión térmica a 323.15 K mediante el uso de la ecuación 24 (Holman, 1986).

$$\beta = \frac{1}{T_4} \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$\beta = \frac{1}{323.15 \text{ K}}$$

$$\beta = 3.0945 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Se calcula la longitud característica, mediante el despeje de la ecuación 26 (Ushiña, 2014).

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_H} + \frac{1}{L_V} + \frac{1}{L_L} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

L_H : Longitud horizontal del horno [m]

L_V : Longitud vertical del horno [m]

L_L : Longitud lateral del horno [m]

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{0.512\text{m}} + \frac{1}{0.512\text{m}} + \frac{1}{0.612\text{m}}$$

$$L = \frac{1}{\frac{1}{0.512\text{m}} + \frac{1}{0.512\text{m}} + \frac{1}{0.612\text{m}}}$$

$$L = 0.1804 \text{ m}$$

A continuación, se emplean los valores de densidad, viscosidad dinámica y número de Prandtl del aire a 50 °C, que es la temperatura en la superficie exterior del horno, obtenidos de la Tabla 6 de las propiedades del aire a diferente temperatura.

$$Gr = (33 \text{ K} \cdot 3.094 \cdot 5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}) \left[\frac{(0.1804 \text{ m})^2 \cdot (1.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})^2 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{(1.963 \cdot 10^{-5} \frac{\text{k}}{\text{ms}})^2} \right]$$

$$Gr = \mathbf{1.82 \times 10^7}$$

Para encontrar el número de Rayleigh considerando datos de la tabla 6 y los anteriormente calculados, se lo realiza a través de la ecuación 27 (Holman, 1986).

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$Ra = (1.82 \times 10^7) \cdot (0.7228)$$

$$Ra = \mathbf{1.315 \times 10^7}$$

Para finalizar y encontrar el número de Nusselt, aplicamos la ecuación 23 consolidando todos los datos obtenidos (Holman, 1986).

$$\text{Si } 10^4 \leq Gr \cdot Pr \leq 10^9 \Rightarrow Nu = C(Gr \cdot Pr)^m \Rightarrow C = 0.59 \quad m = \frac{1}{4}$$

$$Nu = 0.59 \cdot (1.315 \times 10^7)^{1/4}$$

$$Nu = \mathbf{35.53}$$

Aplicamos la ecuación 22 para hallar el coeficiente de transferencia de calor

$$h = \frac{35.53 \cdot 0.02735 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0.1804 \text{ m}}$$

$$h = \mathbf{5.38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}$$

Se obtiene el valor de la resistencia de calor por convección ecuación 20.

$$R4_{conv} = \frac{1}{5.38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 1.778 \text{ m}^2}$$

$$R4_{conv} = 0.105 \frac{K}{W}$$

Con el uso de la (ecuación 18), se determina la pérdida de calor total.

$$q = \frac{1273.15 K - 290.15 K}{(0.233 + 0.077 + 3.59 \times 10^{-5} + 0.105) \frac{K}{W}}$$

$$q = 2368.47 W$$

3.6 Rendimiento Térmico

En un sistema de calefacción viene determinado por la relación entre el calor suministrado a la carga y el correspondiente calor entregado por el sistema incluyendo las pérdidas.

El rendimiento térmico del horno se determina mediante la ecuación 28 (Ushiña, 2014).

$$\eta = \frac{QC}{QC + q} \quad \text{Ecuación (28)}$$

Para poder realizar el cálculo se requiere que las unidades de cálculo sean compatibles, por lo tanto, al calor suministrado a la carga se lo divide para el tiempo que necesita el horno para alcanzar su temperatura máxima que es de una hora.

$$\eta = \frac{16708.6 W}{16708.6 W + 2368.47 W}$$

$$\eta = 0.8758 = 87.5 \%$$

3.7 Cálculo de la Potencia del Horno

Se lo realiza mediante la relación del calor suministrado por el sistema y su rendimiento en un determinado tiempo ecuación 29 (Astigarraga, 1994).

$$P = \frac{QC}{\eta * t} \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$P = \frac{16708.6 \text{ Wh}}{0.8758 * 1h}$$

$$P = \mathbf{19078.1 \text{ W}}$$

3.8 Calculo de la Resistencia y Corriente de Trabajo

$$R = \frac{V^2}{P} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$R = \frac{220^2}{3300}$$

$$R = \mathbf{14.66 \Omega}$$

Se adquirió una resistencia de 15 Ω de 3300 watts con la finalidad de obtener una mejor distribución de la generación de calor y el tiempo de calentamiento disminuya.

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ecuación (31)}$$

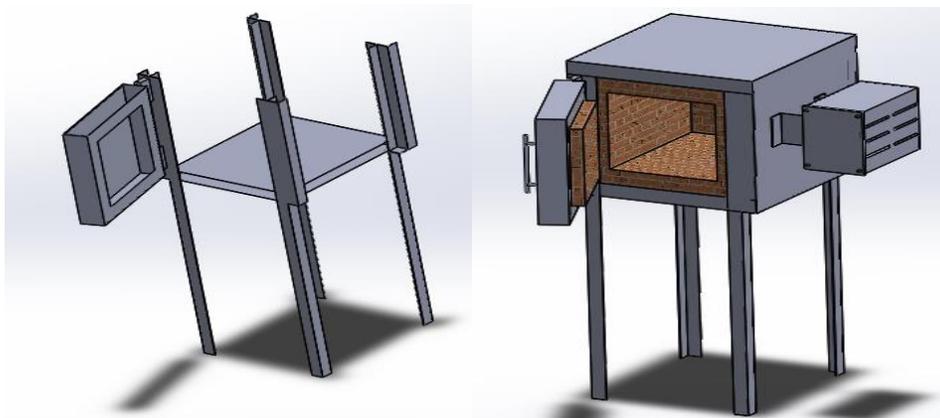
$$I = \frac{220}{14.66}$$

$$I = \mathbf{15 \text{ A}}$$

Mediante el uso del software SolidWorks se procede a modelar la estructura del horno mufla que servirá como soporte de los ladrillos refractarios, además se añade la estructura que soportará a la puerta del horno para lograr un mejor soporte figura 28.

Figura 28.

Estructura metálica modelada en SolidWorks.



Nota. La estructura es construida por ángulos de (40 x 3) mm de acero inoxidable.

Para la construcción de la cámara interna del horno, se procede a la construcción de las paredes con ladrillo refractario y mortero refractario figura 29; materiales seleccionados por su bajo coeficiente de transmisión de temperatura y capaces de soportar temperaturas de 1400 °C.

Figura 29.

Construcción de las paredes del horno mufla.



Nota. El ladrillo refractario se une con mortero refractario que posee características similares en su composición de alta alúmina.

Una vez terminadas las paredes se realizan los canales que alojaran a la resistencia KANTAL A1, este proceso se lo hace en las dos paredes laterales del horno y en la pared posterior, es necesario el uso de herramientas específicas para el corte del ladrillo refractario que por sus componentes lo hacen de difícil corte.

Figura 30.

Corte de canales para la resistencia del horno mufla.



Nota. Es necesario realizar canales para fijar la resistencia que genera el calor.

Ya con las paredes listas adheridas las resistencias se proceden a ensamblar la cama interna del horno, todas las uniones se realizan con el mortero refractario para evitar que existan fugas de calor por las uniones de las paredes figura 31.

Figura 31.

Ensamblaje de las paredes del horno mufla.



Nota. La imagen muestra como se arma la cámara interna del horno y se fija con mortero refractario.

Terminada la cámara interna del horno se realiza la colocación del termopar o termocupla que es el instrumento que censará la variación de temperatura en el interior de la cámara; en la parte superior de la pared trasera del horno figura 32.

Se toma en consideración que la termocupla tiene la ubicación estratégica donde la temperatura homogénea gracias a la ubicación de la resistencia generadora de calor.

Figura 32.

Colocación de la termocupla dentro del horno.



Nota. Al fondo en la parte superior se encuentra la termocupla con recubrimiento cerámico la que la hace optima en este tipo de aplicación.

Para aislar de mejor manera el horno se procede a cubrir el exterior de la cámara hecha de ladrillo refractario con la manta cerámica la cual cumple el rol de no permitir que el calor se disipe hacia el exterior y manteniendo la superficie externa del horno fría figura 33.

Figura 33.

Colocación de la manta cerámica alrededor del horno.



Nota. La manta cerámica cubre todas las paredes del horno así se logra aislar el calor producido en el interior y aprovechar la energía en el interior.

La cubierta del horno es elaborada de una plancha metálica de 3 mm de espesor y además es cubierta de pintura de alta resistencia al calor de hasta 1200 °C figura 34.

Figura 34.

Limpieza y aplicación de pintura resistente a altas temperaturas.



Terminada la cámara interna y su recubrimiento se procede a realizar la conexión del sistema eléctrico y de control de temperatura con todos los accesorios eléctricos que brindaran señales del proceso y además accesorios de seguridad ante inconvenientes eléctricos que puedan suscitarse figura 35.

Figura 35.

Pruebas de conexiones eléctricas del horno.



Con el horno listo se procede a realizar las pruebas correspondientes para verificar su funcionamiento figura 36 y figura 37.

Figura 36.

Pruebas de funcionamiento del horno mufla.



Figura 37.

Pruebas de funcionamiento del horno mufla.



CONCLUSIONES

- En la implementación de este tipo de hornos mufla hay que considerar de manera minuciosa los materiales que lo conformaran, ya que de estos depende el funcionamiento óptimo y evita problemas tanto en el proceso de tratamiento de los metales como en la seguridad al trabajar con temperaturas altas.
- El material refractario nacional no brinda las propiedades necesarias para la implementación de este tipo de equipos, siendo necesario acudir a empresas importadoras; además en el exterior existen materiales que facilitarían el trabajo de construcción de hornos.
- En el mercado nacional existen este tipo de equipos comercializados en valores de tres veces el valor del proyecto implementado.
- Las resistencias de KANTHAL A1 utilizadas en la implementación del horno trabajan de manera óptima cumpliendo el objetivo planteado al inicio del proyecto.
- El control de temperatura implementado en el horno se limita a posibles diferentes trabajos como variaciones de temperatura y tiempos determinados para ciertos tratamientos térmicos de manera automática, acción que serían mejor manejada con un mejor sistema de control y añadiendo más elementos electrónicos.

RECOMENDACIONES

- Para la construcción de estos proyectos se debería sobredimensionar los parámetros con los que se va a trabajar como el máximo de temperatura para la obtención de materiales ideales que satisfagan la necesidad del trabajo, manteniendo con seguridad el funcionamiento sin inconvenientes de las maquinas.
- Existen diferentes materiales empleados para la fabricación de las resistencias eléctricas para hornos mufla, las características, el comportamiento a diferentes temperaturas y el trabajo de cada material es diferente por lo que una investigación previa permitirá adquirir el material más idóneo.
- El proyecto del horno mufla puede ser utilizado para fundir ciertos metales si se cambiara el sistema eléctrico y de control siempre y cuando no sobrepasen los 1400 °C.
- El empleo de PLC facilitaría trabajos más complejos y brindaría mejores resultados durante y después del proceso de tratamiento de metales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Çengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos*. Mexico: The McGraw-Hill.
- Acequilabs. (01 de septiembre de 2018). *Acequilabs*. Obtenido de <https://acequilabs.com.co/blog/guias-de-uso/que-es-una-mufla-de-laboratorio/>
- Astigarraga, J. (1994). *HORNOS INDUSTRIALES DE RESISTENCIAS*. Madrid: THE MCGRAW-HILL.
- Ball, D. W. (2005). *Fisicoquímica*. Mexico: Cengage Learning.
- Belzunce, J. f. (2001). *ACEROS Y FUNDICIONES*. Universidad de Oviedo.
- Bóveda, H. (2009). *INSTRUCCIÓN DE HORNO MUFLA*. Catalunya.
- Campillo, B. (1 de Diciembre de 2009). *ResearchGate*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/>
- Carranza Garcia, A. (2011). *TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/albertojea/tratamientos-termicos-del-acero>
- Çengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. Mexico: The McGraw-Hill.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: The McGraw-Hill.
- Chapman, A. (1984). *Transmisión de calor*. Madrid: Bellisco.
- Cinjordiz, C. (Diciembre de 2016). *Infotec.net*. Obtenido de <https://www.infootec.net/rele-estado-solido/>
- Cismatucab. (28 de Febrero de 2020). *cismatucab.blogspot*. Obtenido de <http://cismatucab.blogspot.com/>
- De La Poza, J. M. (1994). *Hornos para tratamiento termico de los metales*. Barcelona: OIKOS TAU S.A.
- Definición MX. (2014). Obtenido de <https://definicion.mx/termodinamica/>

- Derematerialia. (20 de Julio de 2020). *Derematerialia*. Obtenido de <http://www.derematerialia.com/practicass-metalograficas/>
- Falcón, C. (06 de 02 de 2017). *estudiantesenlaboratoristaquimico.blogspot.com*. Obtenido de <http://estudiantesenlaboratoristaquimico.blogspot.com/2013/12/lamufila.html>
- Fernandez, P. (1992). *ingenieria termica y de fluidos*. Santander: Servicio de Publicaciones de la Escuela T. Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- GUTIERREZ, G. (2015). Diseño y construcción de un horno de fundición de minerales auríferos.
- Holman, P. (1986). *Transferencia de calor*. Mexico: Continental.
- Hornos Industriales Ltda. (2018). TRATAMIENTOS TERMICOS. *PROCESOS DE FABRICACION*, 18.
- Instituto Tecnológico de Sonora. (27 de Marzo de 2013). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/tango67/tratamientos-de-los-materiales/16>
- Pérez, A. (Febrero de 2013). Obtenido de Murciaeduca.es: http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/crditos.html
- Pozo, W. (2018). *EVALUACION DE LOS PARAMETROS APLICADOS DURANTE EL TRATAMIENTO TERMICO DEL ACERO AISI M42 EN LA EMPRESA BOEHLER DEL PERÚ S.A.* Peru: Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez.
- PREZI. (16 de octubre de 2013). Obtenido de [prezi.com: https://prezi.com/rff4x6hpsftg/martempering/](https://prezi.com/rff4x6hpsftg/martempering/)
- Quito Abad, J. J. (2016). Diseño y construcción de un horno para tratamientos térmicos con interfaz gráfica para comprobación de dureza del material tratado.
- REDISYT. (2017). *REDISYT*. Obtenido de <http://redisyt.org/portal/index.php/carbolite>

- Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson educacion.
- TERLAB S.A. (17 de octubre de 2018). *FELISA*. Obtenido de <http://www.felisa.com.mx/uploads/7b7a949179afcde6910ff3ef24cb0d61.pdf>
- TP-Laboratorio Quimico. (22 de marzo de 2015). *TP-Laboratorio Quimico*. Obtenido de <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/horno-mufla.html>
- TP-Laboratorio Químico. (22 de marzo de 2015). *TP-Laboratorio Químico*. Obtenido de <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/horno-mufla.html>
- Ushiña, L. (2014). *DISEÑO, REHABILITACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS*. Sangolqui: Universidad de Las Fuerzas Armadas.
- Vega, L. (Mayo de 2016). Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/LoliVegaOmaa/t3-tratamientos-termicos>

ANEXOS