

DISEÑO DE HORNO ELÉCTRICO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS CON  
ATMÓSFERA CONTROLADA

DIEGO FERNANDO DUARTE BARRERO  
JESÚS DAVID VARGAS ALVAREZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
TRABAJO DE GRADO

2018

DISEÑO DE HORNO ELÉCTRICO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS CON  
ATMÓSFERA CONTROLADA

DIEGO FERNANDO DUARTE BARRERO  
JESÚS DAVID VARGAS ALVAREZ

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

JOSE DAVID CASTRO CASTRO  
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
TRABAJO DE GRADO

2018

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios todo poderoso por darme la vida, la oportunidad de estudiar esta linda carrera la cual se ha sacado adelante con esfuerzo y constancia.

A mi esposa Karina Benítez y mi hija Ana Karina Duarte Benítez que han sido un bastión y motivación importante para realizar este proyecto.

A mis padres Gustavo Duarte y Leonilde Barrero Chaves por apoyarme económicamente y me brindaron todo su apoyo durante este proceso de formación.

A mi suegra Luz Norbey Bohórquez por brindarme su apoyo moral y mostrarme que las cosas se consiguen con esfuerzo.

A mi compañero de tesis Jesús David Vargas Álvarez que desde que comenzamos el ciclo profesional ha sido un amigo incondicional, donde hemos sacado adelante situaciones duras.

Al Ingeniero Hivo Alfonso Patarroyo el cual fue el gestor de este proyecto y nos orientó durante este proceso.

Diego Duarte

## **Agradecimiento**

Durante este proceso agradezco a Dios porque guía mis senderos día a día.

A mis padres Fredy Eduardo Vargas y Sonia del Pilar Alvarez por estar siempre presentes y muy pendientes del paso a paso que se realizó durante este proceso.

A mis hermanos Freddy Camilo Vargas, Laura Cristina Vargas, Danny Alejandro Vargas y Rafael López Álvarez por las palabras de apoyo y aliento para llevar a cabo este proyecto.

A mi director de tesis José David Castro por su orientación y asesorías en este largo camino

A mis amigos Johan Alexander Sotelo, Diego Fernando Duarte, Fernando Peña que me han brindado su amistad incondicional

A mi amiga y enamorada Alejandra Sanabria, por darme palabras de apoyo e incondicionalidad.

Finalmente, a todas las personas que en este momento se me escapan y estuvieron conmigo durante mi proceso de formación académica y personal.

Jesús Vargas

## Resumen

La tesis “Diseño de Horno Eléctrico para Tratamiento Térmico con Atmosfera Controlada” tiene como objetivo diseñar un horno que trabaje con resistencias eléctricas en un rango de temperaturas de 1000 °C a 1400 °C controlado por un sistema de control (PLC) y una atmosfera controlada, para el laboratorio de metales y tratamientos térmicos de la facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Con el fin de proteger la superficie de aceros al carbono, aceros inoxidable y aleaciones de aluminio, inundando la cámara del horno con un gas inerte (argón), así como diseñar un horno con curva de calentamiento de pendiente aguda y controlar la atmosfera en el interior de la cámara de calentamiento.

En este proyecto de grado se realizaron consultas en libros, artículos de investigación, tesis, folletos técnicos, visitas a proveedores y referencias virtuales con temas afines en diseño de hornos industriales, automatización con énfasis en control de temperaturas, tratamientos térmicos, aislantes térmicos, transferencias de calor en hornos y atmosferas controladas por medio de gases.

Se encontrará la información de los parámetros de diseño que se realizaron con los materiales cerámicos seleccionados para el diseño térmico del horno. Se hizo un cálculo en estado estable conforme a los materiales cerámicos que se utilizaran para el revestimiento para obtener fiabilidad del diseño, se aplicaron los conceptos de transferencia de calor para determinar la potencia total requerida para seleccionar las resistencias eléctricas.

Además de lo anteriormente nombrado se hace una introducción al sistema de control (PLC) y se sugiere elementos para protección y regulación del sistema eléctrico, basados en un criterio técnico para su implementación.

**Palabras claves: Horno eléctrico, Atmósfera controlada, tratamientos térmicos, Aceros y aleaciones.**

## **Abstract**

The thesis "Design of Electric Furnace for Thermal Treatment with Controlled Atmosphere" has the objective of designing a furnace that works with electrical resistances in a temperature range of 1000 ° C to 1400 ° C controlled by a control system (PLC) and an atmosphere controlled, for the laboratory of metals and thermal treatments of the faculty of engineering of the University Foundation Los Libertadores.

In order to protect the surface of carbon steels, stainless steels and aluminum alloys, by flooding the furnace chamber with an inert gas (argon), as well as to design a furnace with an acute slope heating curve and to control the atmosphere in the inside of the heating chamber.

In this degree project, queries were made on books, research articles, theses, technical brochures, visits to suppliers and virtual references with related topics in the design of industrial furnaces, automation with emphasis on temperature control, thermal treatments, thermal insulators, transfers of heat in ovens and atmospheres controlled by means of gases.

You will find the information of the design parameters that were made with the ceramic materials selected for the thermal design of the furnace. A steady state calculation was made according to the ceramic materials that will be used for the coating to obtain design reliability. The heat transfer concepts were applied to determine the total power required to select the electrical resistances.

In addition to the above, an introduction to the control system (PLC) is made and elements for protection and regulation of the electrical system are suggested, based on a technical criterion for its implementation.

**Keywords: Electric furnace, controlled atmosphere, thermal treatments, steels and alloys.**

## Contenido

Agradecimiento .....	3
Resumen.....	5
Abstract .....	6
Introducción .....	13
1 Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos específicos .....	14
2 Marco Teórico .....	15
2.1 Línea histórica.....	15
2.2 Tratamiento Térmico.....	18
2.3 Clasificación de los tratamientos térmicos. ....	19
2.3.1 Normalizado. ....	21
2.3.2 Temple. ....	21
2.3.3 Revenido.....	21
2.3.4 Recocido. ....	21
2.4 Hornos industriales.....	22
2.4.1 Clasificación de los hornos. ....	23
2.4.2 Partes principales de un horno.....	23
2.4.3 Proceso de calentamiento.....	26
2.4.4 Sistemas de control de hornos eléctricos .....	27
2.4.5 Selección de los elementos a utilizar para el sistema de control.....	28
2.4.6 Tipo de atmósfera.....	30
2.4.7 Tipo de Solera.....	31
2.5 Mecanismos de Transferencia de Calor .....	31
2.5.1 Conducción.....	32
2.5.2 Convección.....	33
2.5.3 Radiación.....	34
3 Parámetros de Diseño del Horno Eléctrico. ....	36
3.1 Configuración del Horno Eléctrico. ....	37
3.2 Características de los materiales utilizados en las capas del revestimiento.....	37
3.2.1 Ladrillo refractario UA - 23 .....	38

3.2.2	Mortero refractario Universal .....	38
3.2.3	Fibra cerámica .....	38
3.2.4	Tabla cerámica.....	39
3.3	Cálculo térmico de los espesores de pared.....	39
3.3.1	Disposición de los Materiales en las Capas de Revestimiento.....	40
3.3.2	Cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes del revestimiento.....	40
3.3.3	Consideraciones para el cálculo. ....	42
3.3.4	Calor perdido por conducción.....	43
3.3.5	Calor perdido por convección-radiación. ....	43
3.3.6	Calor que se pierde al ambiente por convección y radiación es:.....	44
3.3.7	Resultado y perfil de temperaturas.....	46
3.4	Calor total perdido a través de las paredes.....	48
3.4.1	Calor perdido a través de las paredes verticales. ....	48
3.4.2	Calor perdido a través de las paredes horizontales.....	49
3.5	Cálculo del Calor Total Acumulado .....	51
3.6	Determinación de la Potencia Eléctrica. ....	54
3.7	Cálculo y Selección de las Resistencia Eléctricas .....	55
3.8	Fórmulas y Consideraciones a Utilizar para el Cálculo .....	55
3.9	Disposición y Cálculo de las Resistencias. ....	57
3.10	Cálculo de la estructura metálica y selección del PLC.....	60
3.11	Selección de la atmósfera.....	63
4	Presupuesto .....	65
5	Recomendaciones.....	68
6	Bibliografía.....	69



## Lista de figuras

Figura 1. Transferencia de Calor por Conducción.....	33
Figura 2. Transferencia de Calor de una superficie caliente hacia el aire por Convección.....	34
Figura 3. Transferencia de Calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan .....	36
Figura 4. Configuración del horno .....	37
Figura 5. Disposición de los materiales de revestimiento.....	40
Figura 6. Esquema del modelo de transferencia de calor .....	41
Figura 7. Esquema para el cálculo del volumen.....	52
Figura 8. Ángulo que se utiliza para el cálculo .....	61

## Lista de diagramas

Diagrama 1 Diagrama Hierro-Carbono.....	20
Diagrama 2. Clasificación de Hornos .....	23
Diagrama 3. Diagrama de bloques de un control automático para hornos de resistencia.....	28

## **Lista de gráficas**

Gráfica 1. Representación general de un tratamiento térmico. ....	19
Gráfica 2. Perfil de temperatura en las paredes del revestimiento. ....	47

## **Lista de tablas**

Tabla 1. Propiedades de los materiales de revestimiento .....	39
Tabla 2. Dimensiones y propiedades de los materiales. ....	45
Tabla 3. Temperaturas calculadas. ....	47
Tabla 4. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento .....	52
Tabla 5. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento .....	53
Tabla 6. Resultados del cálculo térmico.....	54
Tabla 7. Ventajas y desventajas de los gases.....	64
Tabla 8. Presupuesto del diseño realizado.....	66

## Introducción

El proceso de tratamiento térmico en los metales permite la transformación de sus propiedades, por medio de un calentamiento y enfriamiento controlado. Se pueden dar a mayores o menores tiempos de permanencia, rangos de temperatura, velocidades de calentamiento y enfriamiento de acuerdo con el tipo de material; por este motivo, es necesario un dispositivo que pueda alcanzar altos rangos de temperatura en menor tiempo sin alterar las propiedades del material a tratar [1].

En el laboratorio de tratamientos térmicos de la Fundación Universitaria Los Libertadores se encuentran dos hornos en donde la máxima temperatura de trabajo no llega a superar los 1000°C, lo cual se hace necesaria la implementación de un horno eléctrico con atmósfera controlada para que alcance las temperaturas requeridas para realizar los ensayos en menor tiempo y evitar la deslaminación, descarburación y formación de cascarilla (óxidos) del material. Con este horno se pretende facilitar el trabajo de investigación en general y en los ensayos de tratamientos térmicos para el desarrollo de la industria nacional [2], [1].

# **1 Objetivos**

## **1.1 Objetivo General**

Diseño de un horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmosfera controlada con una temperatura máxima de 1200 °C

## **1.2 Objetivos específicos**

- Hacer una revisión bibliográfica sobre la teoría existente sobre los hornos eléctricos para tratamientos térmicos.
- Realizar el cálculo térmico del horno eléctrico con una temperatura máxima de trabajo de 1200°C.
- Realizar el cálculo estructural del horno eléctrico.
- Designar los materiales específicos de los componentes del horno eléctrico según el diseño realizado.
- Evaluar los costos del diseño efectuado del horno eléctrico.
- Investigar los tipos de gases a usar en la atmósfera controlada, mecanismos de funcionamiento y manipulación segura del horno eléctrico diseñado.

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Línea histórica

A ciencia cierta no hay ningún indicio o fecha exacta que nos indique la fabricación del primer horno, desde las comunidades neolíticas las cuales forjaban cuchillos y utensilios en cobre, hasta pasar por la cultura china la cual fabricó el primer horno. Luego en el siglo XVIII en Inglaterra se creó el primer horno para un proceso industrial de fundición [3].

Según la investigación planteada por la revista Metalactual, nos muestra el artículo de cómo ha sido el papel indispensable de los gases en la industrial, especialmente en la metalurgia. Esto a los eficientes comportamientos más comunes como lo son la soldadura y los tratamientos térmicos. En los tratamientos térmicos ha sido fundamental el gas argón puesto que protege la superficie de los metales ya que es un gas neutro y no reacciona químicamente con ninguna sustancia. También existen mezclas para evitar la oxidación de las piezas como el amoniaco e hidrocarburos gaseosos mezclados con nitrógeno, estas mezclas de gases sustituyen a las sales de cianuro que se utilizan para el endurecimiento de piezas metálicas y son altamente contaminantes [4].

En el artículo realizado por Fabio Enrique Castillejo Nieto y Jhon Jairo Olaya Flórez sobre recubrimientos de VC y NBC producidos por DRT: tecnología económica, eficiente y ambiental limpia, encontrado en la base de datos de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se puede evidenciar que se presentan fundamentos del proceso de deposición por difusión termoreactiva, una técnica que permite producir recubrimientos duros de forma económica sin ser invasiva o agresiva con el medio ambiente. En la investigación se propone una metodología experimental para desarrollar recubrimientos de carburos de vanadio (vc), y carburos de niobio (NbC), sobre aceros aisi H13, utilizando en el proceso de fabricación DRT, bórax fundido, aluminio y ferroaleaciones a 1020 °C durante cuatro horas. Estos recubrimientos presentan altas durezas, buena resistencia al desgaste, excelente adherencia al sustrato, buena resistencia a la corrosión y bajos coeficientes de fricción. Los recubrimientos obtenidos por DTR se producen en crisoles dentro de hornos de resistencia a altas temperaturas, no requieren algún tipo de atmosfera protectora y adicionalmente el proceso no emite ningún tipo de gases contaminantes. Los resultados confirmaron la presencia de recubrimientos de carburo de vanadio y carburo niobio con buena regularidad en el espesor, altas durezas y una mejora en la resistencia a la corrosión en comparación con el acero sin recubrimiento [5].

En el artículo de investigación de Tratamientos térmicos de Aceros de Bajo Carbono en Horno de Atmósfera Controlada realizada por Fernando Franco y José Harrison

Paz para la revista Ingeniería y competitividad, del año 2004, Vol. 6 (2) páginas 56 – 64 encontrado en la base de datos de la Fundación Universitaria Los libertadores, se identifica que se definieron parámetros para la construcción de un generador de atmosfera controlada endotérmica y un horno para tratamiento térmico de aceros en medios gaseoso en la Universidad del Valle. Se realizó la evaluación experimental del equipo desarrollado mediante el tratamiento térmico de temple de dos aceros normalizados tipo AISI 1018 Y 1025 en una atmósfera protectora. Se escogió el propano comercial como gas generador y un catalizador de Alúmina-Níquel para proporcionar la reacción. Como resultado de identifica que es posible proteger un acero AISI 1018 Y 1025 de la descarburación con ayuda de un sistema generador de gas endotérmico, a través de una dosificación adecuada del propano y aire. La atmósfera obtenida para una temperatura de reacción de 1010°C tuvo un efecto endurecedor sobre las propiedades del acero tratado. Se produjo descarburación reflejado en la pérdida de peso en las muestras con el gas endotérmico generado a 1050°C. Con el suministro de gas propano más controlado se podría garantizar una operación más confiable en el tratamiento térmico y una atmosfera que sea ligeramente carburante [6].

Según la investigación realizada por Kingston Process Metalurgy en Kingston, Ontario, Canadá con respecto a la minimización de las pérdidas de cobre en la escoria de fundición de cobre durante el tratamiento con hornos eléctricos encontrada en la base de datos de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se encontró que las condiciones necesarias para obtener pérdidas mínimas de cobre durante la limpieza del horno eléctrico de la escoria de fusión de cobre se deben seguir los procedimientos de diagnóstico, correctos, la química de la escoria y el procedimiento operativo estándar del horno eléctrico se puede optimizar para alcanzar un contenido de cobre más bajo en la escoria de descarte. Esta investigación se realiza para lograr la mayor recuperación de metal durante la fundición de concentrados de cobre. El trabajo experimental se realizó bajo condiciones de limpieza de escoria para diferentes niveles de cobre. La investigación conlleva a la variación en los niveles de cobre y mate con respecto al peso del material. Todos los experimentos se realizaron a una temperatura de 1200 °C a partir de condiciones termodinámicas, de la experiencia industrial y de los resultados obtenidos por los estudios realizados. La investigación proporciono una medición experimental del nivel del cobre soluble en escorias de fundición de cobre en equilibrio con cobre mate. El objetivo final del trabajo actual fue evaluar el nivel mínimo de cobre soluble que se puede lograr en operaciones de limpieza de escoria de horno eléctrico en condiciones en las que existe una pequeña capa de cobre fundido [7].

Dado el costo cada vez mayor de la energía y el atractivo precio actual del cobre, varias plantas están considerando la inversión de capital necesaria para pasar de la limpieza de escorias pirometalúrgicas al enfriamiento lento de la escoria, la molienda y la flotación. Se recomienda operar el horno con temperatura de escoria entre



1220°C y 1240°C al final del ciclo de reducción. El límite inferior de temperatura servirá para minimizar la acumulación de magnetita en la interfaz de escoria / metal y el límite superior es evitar una alta solubilidad del cobre en la escoria [7].

En el artículo “implementación de la tecnología de tratamientos térmicos con atmósfera gaseosa controlada en forjas bolívar S.A.” expuesto por L. J. Rodríguez Vélez, A. Ortiz Cárdenas, C. A. López, J. Moy de la universidad de Antioquia, muestran la importancia de los tratamientos térmicos para la empresa Forjas Bolívar. Donde implementaron un horno de cementación con atmosfera controlada donde tienen un estricto control en las variables de temperaturas, tiempos, potencial de carbono, calidad en las piezas después de los tratamientos térmicos y la aplicación del sistema de gestión ambiental para que los procesos de temple, recocido, normalizado, revenido y cementación sean más amigables con el medio ambiente. Después de la implementación del horno se tornó indispensable que Forjas Bolívar desarrollara a través de este proyecto, sus procesos de tratamientos térmicos exclusivamente para piezas forjadas, para que se pudiera estandarizar las metodologías más adecuadas para cada una de las piezas. Adicional se logra la recuperación del carbono perdido en la superficie gracias a la atmósfera del horno de cementación, único proceso en el cual se puede controlar con exactitud el potencial de carbono y obtener resultados de óptima calidad. Se evidencia que se alcanza una calidad aceptada por las normas aplicables a los tratamientos térmicos que ofrece la nueva planta y el montaje de dicha planta se realizó teniendo en cuenta producir el mínimo de residuos [8].

En los tratamientos térmicos se requiere la protección de la capa externa o superficie de los materiales a tratar. Se realiza generalmente en metales ferrosos con carbón, por lo cual puede alterar químicamente la estructura o la zona de contacto. En ocasiones no se protege la superficie de dichos materiales generando delaminaciones o formaciones de cascarilla (óxido) [9].

Cuando se realiza el tratamiento térmico se genera una reacción indeseable que es la descarburación superficial, la cual consiste en la pérdida de carbono en las zonas periféricas de los aceros expuesto a temperaturas superiores a los 210°C, dando como resultado pérdida de masa, cambios en la geometría de la pieza a tratar y variación en las medidas de ajuste dadas en mecanizados definitivos. Estos efectos indeseables son obtenidos en las prácticas de tratamientos térmicos realizados en los hornos actuales de la facultad [10].

En procesos de investigación, una atmósfera no controlada influencia de manera negativa la reproducibilidad y obtención de datos. Los hornos de tratamiento térmico poseen curvas características, la cual informa la velocidad de calentamiento desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de la crítica superior A3 (para el caso de Aceros), en los hornos la temperatura máxima es obtenida en tiempos superiores a una hora, lo cual impacta en las sesiones de práctica. Para llegar a las condiciones de austenización en los actuales hornos se realizan lecturas por parte

de los estudiantes de manera análoga para el horno monofásico y de manera digital para el horno trifásico, careciendo de programación y registro de las condiciones de tratamiento [9].

La medición en tiempo real de la temperatura y la programación nos servirá para tener una mayor confiabilidad en la obtención de los datos al momento de realizar el tratamiento térmico en la probeta [9].

Jonhny F. Obando B., Álvaro Castro P., Carlos Alexander Trujillo en su investigación, “diseño y construcción de un prototipo controlado para carburización gaseosa de aceros utilizando alcoholes” diseñaron un horno para realizar tratamientos térmicos con atmósfera controlada y estudiar el comportamiento de la carburización gaseosa de los aceros con alcoholes. Para esta investigación se hizo una mezcla de 3 gases y 2 líquidos volátiles el cual generó una reacción isotérmica, inerte y hermética. Una zona de análisis de gases donde retiene sólidos y líquidos condensables contando con sensores de presión y de dióxido de carbono. Se realizaron varios ensayos con diferentes clases de alcoholes los cuales arrojaron un resultado donde el alcohol metílico carburiza, pero produce una baja cantidad de hollín, pero profundiza poco en la pieza. Otro fue el etanol donde carburiza bastante y deja gran cantidad de hollín en la superficie de la pieza. Los otros fueron n-propanol, isopropanol y el tertbutamol proveen de buenos potenciales de carbono y profundizan la capa de la pieza generando bastante hollín y alquitrán [11].

## 2.2 Tratamiento Térmico.

El tratamiento térmico es un proceso de calentamiento y enfriamiento donde varían las propiedades físicas o mecánicas y generan cambios microestructurales o de la composición en un material, generalmente en metales y aleaciones. El tratamiento térmico no modifica la composición química de los materiales, pero si les proporciona propiedades específicas para su uso final, se requiere que estos cambios sean permanentes [10], [9].

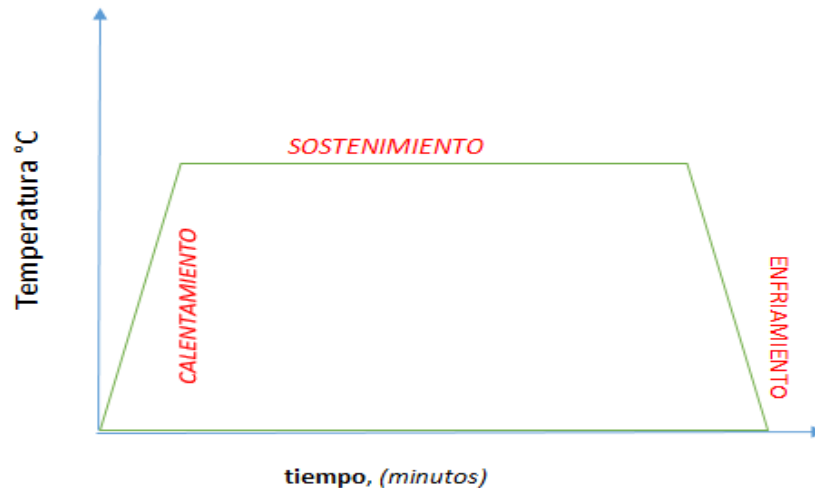
La importancia de los tratamientos térmicos es mayor, cuando más críticas sean las condiciones de servicio y más complejas las aleaciones utilizadas. Para los tratamientos térmicos se puede considerar 4 parámetros fundamentales que son:

1. **Temperatura de calentamiento.** Es la máxima temperatura que se determina a la que se calienta el material y asegura el cambio o transformación de fase.
2. **Tiempo de permanencia.** Es el tiempo que permanece el material a la temperatura de calentamiento, durante ese tiempo se logra el cambio o transformación parcial o total de la microestructura del material, se vuelve uniforme la temperatura de todo el material.

3. **Velocidad de calentamiento.** Es la velocidad en la que se genera el aumento progresivo de la temperatura del material en un intervalo de tiempo determinado.
4. **Velocidad de enfriamiento.** Es la disminución de la temperatura del material en un intervalo de tiempo determinado, de este parámetro dependen las características finales del material. [10]

Estas variables están representadas en un diagrama Temperatura vs tiempo. A continuación, se muestra una gráfica característica de un tratamiento térmico [12].

*Gráfica 1. Representación general de un tratamiento térmico.*

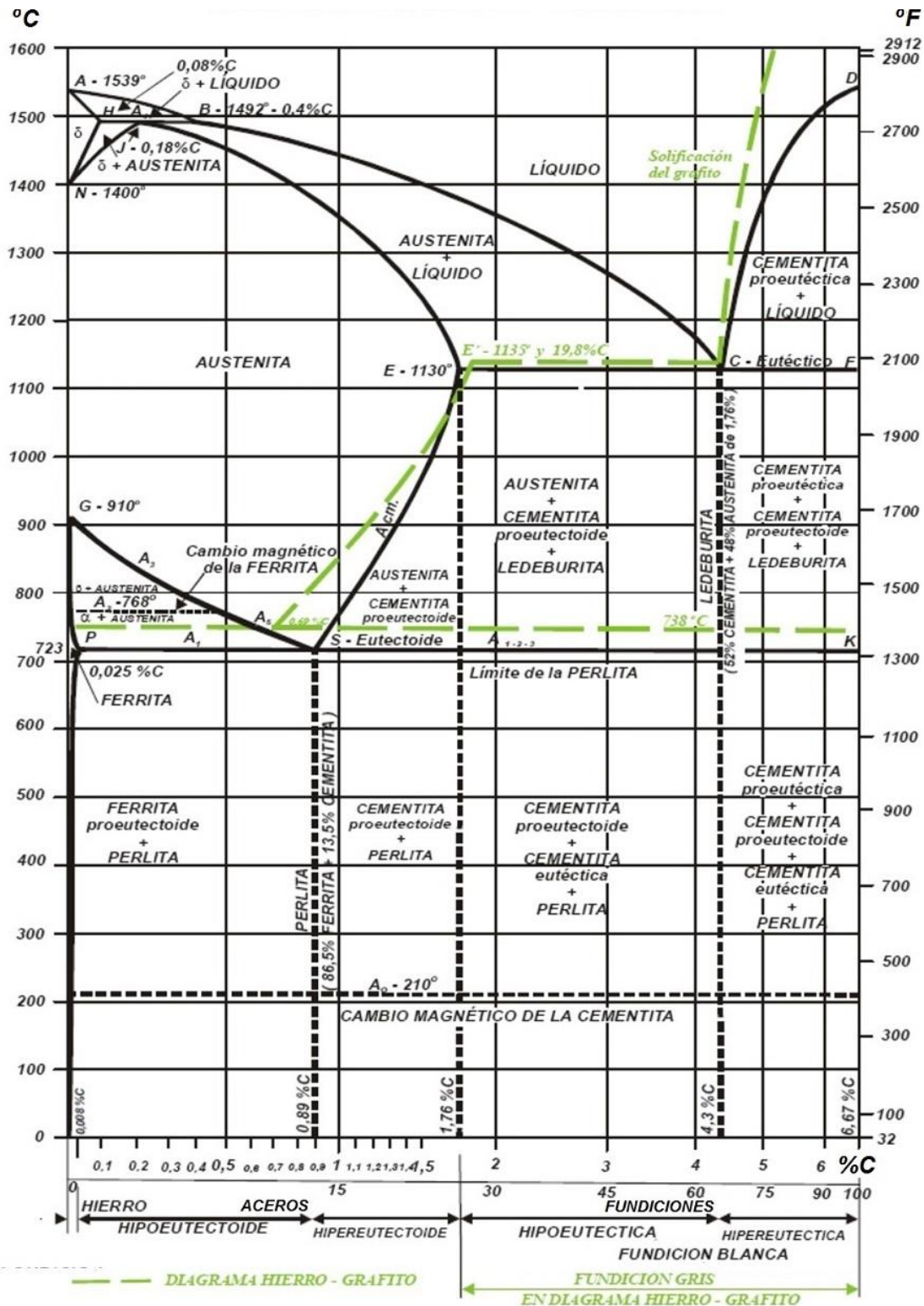


Fuente: Los autores.

### 2.3 Clasificación de los tratamientos térmicos.

En general se tienen cuatro tipos de tratamientos térmicos que son Normalizado, Temple, Revenido y Recocido. En la figura 2, se muestra el diagrama hierro-carbono que sirve para representar las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura [13].

Diagrama 1 Diagrama Hierro-Carbono



Fuente: [13].

### **2.3.1 Normalizado.**

Este tratamiento térmico busca mejorar las propiedades mecánicas como la dureza, resistencia a la tensión o para recuperar propiedades en bruto a la colada, que se hayan modificado por la aplicación de soldadura o por otro tratamiento en el material. El normalizado consiste en un calentamiento del material a una temperatura tenuemente más elevada que la crítica superior (723 ° C), seguida de un enfriamiento en aire tranquilo [9].

### **2.3.2 Temple.**

Consiste en un calentamiento del material a una temperatura tenuemente más elevada que la crítica superior (723°C), llevándola a un enfriamiento rápido. Esto se logra al sumergir la pieza en agua, aceite, solución polimérica sal o aire comprimido. Por medio del temple se busca endurecer y aumentar la resistencia del material [9], [10].

### **2.3.3 Revenido.**

Tiene por objeto eliminar tensiones ya creadas en temple o normalizado, mejorando la tenacidad del material. El revenido consiste en aplicar un ciclo térmico por debajo de la temperatura inferior a la crítica Ac1, para obtención de propiedades mecánicas específicas, para la utilización de procesos de fabricación o maquinado [9], [10].

### **2.3.4 Recocido.**

Existe variedad de tratamientos térmicos con el nombre de recocido que tiene como objeto producir cambios en especial ablandar y aumentar la ductilidad del material. En ocasiones también sirve para regenerar su microestructura o eliminar tensiones internas [9], [10]. Se encuentran diferentes tipos de recocidos, los cuales se pueden clasificar en tres grupos:

1. Recocidos de austenización completa o de regeneración
2. Recocidos subcríticos:
  - Recocido de ablandamiento
  - Recocido contra acritud
  - Recocido subcrítico globular

### 3. Recocido de austenización incompleta (globulares)

#### **2.4 Hornos industriales**

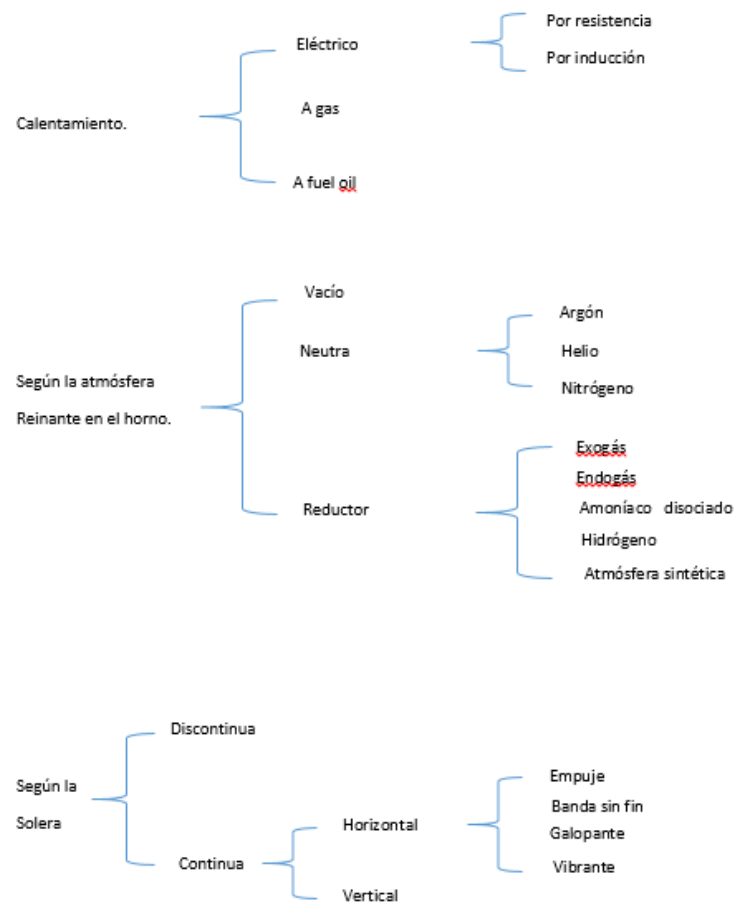
Los hornos industriales son dispositivos o equipos utilizados para calentar o fundir piezas a diferentes temperaturas, colocándolos en su interior por encima de la temperatura ambiente; las cuales producirán reacciones químicas dependiendo la obtención del producto deseado. También se puede tratar térmicamente un material para impartir determinadas propiedades, ablandar los materiales para una operación de conformado posterior, y recubrir las piezas con otros materiales [14].

Este calentamiento se puede realizar de forma directa sobre las piezas a tratar o de forma indirecta por transmisión de calor desde otros elementos por mecanismos de transferencia de calor como conducción, convección y radiación.

### 2.4.1 Clasificación de los hornos.

Partiendo de las diferentes formas de calentamiento, atmósfera reinante y solera se da la siguiente clasificación de hornos en el diagrama 2.

Diagrama 2. Clasificación de Hornos



Fuente: [15].

### 2.4.2 Partes principales de un horno.

Los hornos se dividen de acuerdo con los fines con que fueron ideados y, por lo cual, tienen características específicas o apropiadas para cada caso, sin embargo, tienen toda una serie de elementos constructivos comunes, aunque diseños distintos.

La zona de trabajo es la parte principal del horno, en esta se realiza el proceso para el cual se ha diseñado, por lo general esta zona se separa del ambiente por medio de la bóveda, las paredes y la solera, construidas de materiales refractarios y termoaislantes, además, en su base tienen los cimientos, contruidos de materiales comunes.

#### **2.4.2.1 Cimientos**

En un horno los cimientos son la parte que se apoya directamente en el suelo y su principal función es sostener las demás partes del horno, es decir, lo único que se requiere de los cimientos es su absoluta solidez para soportar toda la carga estática, así como eventuales cargas dinámicas sin sufrir ningún deterioro, los cimientos se dimensionan de tal manera que la presión contra el suelo no supere los valores permisibles.

#### **2.4.2.2 Plataforma**

La plataforma se ubica sobre los cimientos y debajo de la mampostería. Para su construcción se emplean distintos materiales: ladrillos refractarios y termoaislantes; el tipo de construcción y el espesor de la plataforma se dictan por la estructura del horno. Su principal función es proporcionar una superficie sobre la cual se apoyen las demás partes del horno.

#### **2.4.2.3 Solera**

La solera es la parte del horno sobre la cual se disponen los materiales a calentarse. Como soporta la carga del material debe ser suficientemente sólida, y químicamente estable.

La solera debe soportar: la erosión por el acero fundido, la penetración de materiales bajo punto de fusión, el impacto mecánico en el caso de caída de la chatarra y la posible hidratación entre procesos.

#### **2.4.2.4 Bóveda**

La bóveda es una de las partes más importantes del horno. Generalmente soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Como los gases calientes en la parte



superior de la zona de trabajo se encuentran bajo una presión superior a la normal, la bóveda debe ser impermeable a estos gases calientes.

Los refractarios de la bóveda deben ser capaces de soportar: el choque térmico por fuertes variaciones de temperatura, la radiación térmica y eventualmente el impacto mecánico.

#### **2.4.2.5 Paredes**

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno, generalmente soportan la bóveda y altas temperaturas. Deben proteger la zona interna de las pérdidas de calor y no permitir la salida de los gases ni la succión del aire de la atmósfera hacia el interior. La cara más importante de las paredes es la interior. Debe ser pareja, limpia y tener juntas delgadas.

La parte superior de las paredes debe soportar el choque térmico por las fuertes fluctuaciones de temperatura.

#### **2.4.2.6 Juntas Térmicas**

Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor. Asegurando la integridad de la mampostería, las juntas a la vez no deben rebajar la solidez de la misma y ser causa de escapes de gases, metales o escorias.

El ancho y la disposición de las juntas se determinan en concordancia con el calentamiento de una parte dada del horno y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

#### **2.4.2.7 Estructura Metálica**

Se le llama esqueleto a la estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que son originados por la mampostería tanto durante su ejercicio y posteriormente en el trabajo de los procesos.

La estructura metálica transmite estos esfuerzos a los cimientos. Las partes del esqueleto también se aprovechan para montar sobre ellas los accesorios del horno, como: marcos, tapas, puertas, ventanas, mecheros, toberas, etc.

#### **2.4.2.8 Ventanas de Trabajo**

Las ventanas de trabajo permiten cargar y descargar los materiales y objetos en la solera, además sirven para vigilar el proceso al que se someten y para controlarlo; las aberturas de las ventanas se cierran por sus correspondientes puertas a bisagras o a guillotina.

#### **2.4.2.9 Puertas**

Las puertas de los hornos deben ser estancas, ligeras, sólidas y resistentes al calor, así como también tener resistencia mecánica y duración. Permiten el paso para cargar y descargar los materiales. Las puertas pueden ser de tipo bisagra o levadizo, pero en ambos casos se deben garantizar la mayor hermeticidad posible.

### **2.4.3 Proceso de calentamiento**

En esta clase de hornos el sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a alcanzar y está en función del material a tratar térmicamente.

#### **2.4.3.1 Horno de resistencias eléctricas.**

Para el calentamiento de los hornos industriales de resistencias se requiere energía eléctrica y resistencia óhmica directa, para el posterior calentamiento de la pieza a tratar en donde se realiza este calentamiento por efecto Joule y ceden calor a la carga por los diferentes medios o formas de transferencia de calor.

Los hornos eléctricos, a pesar de tener un costo más alto sus ventajas son muy considerables como la facilidad de utilización de fibras cerámicas como aislamiento del horno, ausencia de humos de combustión, mejores condiciones de trabajo alrededor del horno, mayor seguridad del personal y obtener temperaturas muy elevadas, dependiendo del diseño [15].

#### **2.4.3.2 Horno calentado por gas o combustible.**

El calentamiento por gas tiene la ventaja que es de bajo costo y su gran desventaja es que la temperatura alcanzada no supera en la mayoría de casos los 1100 °C, adicional el control de atmósfera y control de temperatura se hace difícil por lo cual este sistema de calentamiento se emplea solo para tratamientos térmicos [15].

#### **2.4.3.3 Horno a Fuel Oil**

En los hornos fuel oil se utiliza una fracción de petróleo obtenida por el residuo en la destilación fraccionada. Es el combustible más pesado de los que se pueden destilar a presión atmosférica. El fuel oil se utiliza como combustible en los hornos para destilar el petróleo haciéndolo circular dentro de tubos dispuestos en serpentines a lo largo de las paredes del horno de combustión. Esta clase de combustible al combinarse con el aire genera contaminantes sólidos (hollín) y gaseosos (monóxido de carbono, gases ácidos, compuestos sulfurosos) afectando la atmósfera [15].

#### **2.4.4 Sistemas de control de hornos eléctricos**

Cada sistema de control se puede dividir en tres secciones generales: dispositivos de entrada (sensores), controladores, y dispositivos de salida (actuadores). Los dispositivos de entrada sienten lo que está sucediendo en el proceso, el controlador decide qué hacer al respecto, y los dispositivos de salida manipulan el proceso para lograr el resultado deseado.

Un controlador lógico programable o PLC es un controlador de uso general, aplicable a muchos diferentes tipos de aplicaciones de control de procesos. A diferencia de los controladores de bucle PID, que son dispositivos de propósito especial destinados para realizar un solo tipo de función de control, un PLC puede ser instruido para hacer casi cualquier cosa con las señales que recibe de los dispositivos de entrada.

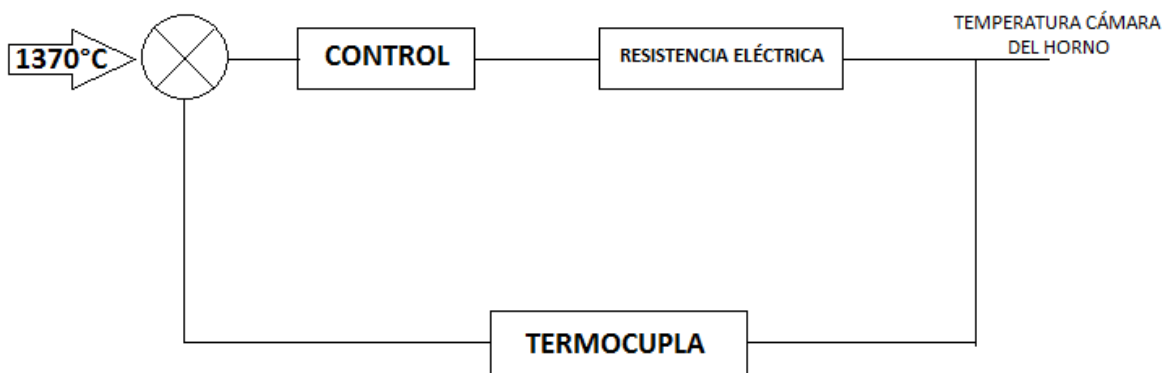
Los PLC se introdujeron en la industria como reemplazos electrónicos para controles de relevadores electromecánicos. La confiabilidad de un PLC electrónico significaba menos fallas del sistema y más vida útil, la reprogramabilidad de un PLC también significaba que se podían implementar cambios en el la estrategia del sistema de control debe ser más fácil que con los circuitos de relevo, donde el recableado era la única forma de alterar la función del sistema.

Además, la naturaleza computarizada de un PLC significaba que el proceso con los datos de control podrían ser comunicados por el PLC a través de redes, permitiendo que las condiciones del proceso sean monitoreados en lugares distantes, y por múltiples estaciones de operador [16].

Los sistemas de control automático por medio de un PLC se pueden resumir en un diagrama de bloques en el cual se muestran las relaciones entre los diferentes elementos que componen los circuitos de control y potencia respectivamente.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la señal de entrada que es ingresada por el operador y que determina la rampa de temperatura para cada proceso.

Diagrama 3. Diagrama de bloques de un control automático para hornos de resistencia.



Fuente: Los autores.

Generalmente el control de temperatura de un horno es el control PID. Cuando el valor medido de la temperatura es diferente a la temperatura fijada, la orden de entrada para el calentamiento o el enfriamiento es controlado para minimizar el error.

## 2.4.5 Selección de los elementos a utilizar para el sistema de control

### 2.4.5.1 PLC (Controlador Lógico Programable)

Se utiliza un sistema de control automático capaz de controlar, administrar, dirigir o regular otro sistema, todo esto para reducir las probabilidades de falla. Para eso se utiliza un PLC el cual funciona por medio de diagrama de bloques el cual nos muestra una de serie de elementos los cuales relacionamos con la parte de la potencia y control.

Se tiene una señal de entrada que es ingresada por el usuario donde se determina cada rampa de temperatura dependiendo el proceso. Para llevar a cabo el control se utiliza un PLC, el emite una salida ON / OFF tipo relé la cual permite controlar el paso de corriente hacia las resistencias. La temperatura del sistema se mide con una termocupla la cual nos genera una mili voltaje y este lo compara con el valor de entrada al PLC y el automáticamente hace la corrección en caso de ser diferente el valor.

Es un dispositivo que se inventó para reemplazar circuitos secuenciales de relés utilizados en el control de máquinas. El PLC trabaja revisando entradas y dependiendo del estado manipula las salidas encendiendo y apagando. El usuario debe ingresar un programa vía software que lleva a la obtención de datos.

Estos dispositivos son usados en aplicaciones diarias en la vida cotidiana. Se utilizan en operaciones de maquinado, embalaje, manejo de materiales, ensamblaje automatizado y en la mayoría de procesos se utilizan por los movimientos repetitivos. Este sistema nos ayuda para minimizar costos, tiempo y reducción de mano de obra.

Un PLC básicamente consiste en una CPU (Unidad Central de Procesos) áreas de memoria y circuitos apropiados para gestionar la obtención de datos de entradas y salidas. El PLC fue el reemplazo de los antiguos relés [17].

#### **2.4.5.2 Termocupla**

Las termocuplas son sensores de temperatura eléctricos y son los que más se utilizan en la industria. Una termocupla está constituida por dos alambres los cuales van unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los alambres se genera un milivoltaje el cual aumenta al incrementar la temperatura. Los cables compensados tienen una polaridad de conexión (positivo y negativo) cuando se hace la conexión debemos de cerciorarnos en la polaridad del alambre para la buena obtención de datos en el monitor [18].

#### **2.4.5.3 Relé**

Un relé es un interruptor el cual es accionado por un electroimán. Está formado por una barra de hierro llamada núcleo, rodeada por hilo de cobre, al pasar corriente por el hilo de cobre el hierro se magnetiza generando un campo magnético convirtiéndose en un imán. A mayor cantidad de vueltas de hilo de cobre y mayor intensidad de corriente más potente es el campo magnético [19].

#### 2.4.6 Tipo de atmósfera

En tratamientos térmicos se entiende por atmósfera la masa gaseosa encerrada dentro del horno que está en contacto con la pieza a tratar las atmósferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor el papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble, por una parte, evita que se produzcan reacciones perjudiciales como la oxidación y la des-carbonización de las piezas. Por otra parte, permite realizar las acciones previstas a saber, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gas sean absorbidas [15].

##### Gases para control de atmósferas

- Nitrógeno. (N) Es un gas inerte, incoloro, inodoro, pertenece al grupo de los no metales, su número atómico es el 7. No es utilizado en protección de atmosferas para altas temperaturas, ya que no es buen conductor de calor a altas temperaturas y no es compatible con otros elementos químicos como el molibdeno, cromo, titanio y columbio. Se utiliza en estado líquido para refrigeración y enfriamiento de los metales para cambio de propiedades mecánicas [20].
- Hidrógeno. (H) Es el primer elemento de la tabla periódica, es gas es incoloro e inodoro, muy reactivo, y no es utilizado para protección de atmosferas para altas temperaturas ya que se vuelve inflamable cuando se combina con aire, oxígeno u otros oxidantes. En las aleaciones el hidrogeno en forma de choque térmico da lugar a una degradación estructural y la pérdida de ductilidad en el material [21].
- Argón. (Ar) Es un gas inerte y no forma compuestos químicos, es incoloro, inodoro, insípido, no corrosivo. Es un 30% más denso que el aire y tiene uso en neutralización de reacciones para crear una atmosfera inerte en procesos de soldadura y tratamientos térmicos. El argón no tiene efectos ambientales, se da naturalmente en el medio ambiente y se disipa en áreas bastante ventiladas, no es aconsejable manipular en recintos cerrados, puesto que el Argón en grandes cantidades puede causar asfixia, mareo, vomito, confusión y hasta pérdida de la conciencia y no daña la capa de ozono [22].
- Helio. (He) Es un gas noble, inerte químicamente, lo cual puede combinarse con otros elementos, no se convierte en radiactivo. En condiciones normales de presión y atmósfera es un gas no inflamable monoatómico, solo se licua en bajas temperaturas y altas presiones. Este gas sirve para reemplazar el hidrógeno cuando se utiliza en altas temperaturas, ya que no es inflamable, generalmente se utiliza para el llenado de globos y soldadura autógena. [23].

- GLP (Gas Licuado de Petróleo). Se obtiene de un proceso de refinación del petróleo, que puede ser propano o butano o una mezcla de ambos, es inodoro, es mezclado con etil mercaptano que le aporta el olor. A presión atmosférica y temperatura ambiente 1atm y a 20°C se encuentra en estado gaseoso. Es de aclarar que al tener contacto el GLP con los aceros puede generar oxidaciones, carburización o descarburación dependiendo de la temperatura y la composición de la atmosfera en el horno, generando monóxido de carbono y dióxido de carbono [24].

Las recomendaciones para la manipulación de las botellas donde embazan el gas es transportarlas en un carro porta cilindros, no rodarlos ni arrastrarlos de manera horizontal, evitar caídas o golpes en la válvula.

Se debe usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo, no se debe calentar la botella para acelerar la descarga del gas, no fumar cerca del área de trabajo, contar con personal capacitado y terminado el proceso cerrar la válvula de la botella para evitar fuga del gas.

#### **2.4.7 Tipo de Solera**

La solera es la parte del horno sobre la cual se sitúa la pieza o los materiales a calentarse y se pueden clasificar en: *Solera Continua*. El horno trabaja de forma regular en un proceso sin intermitencias debido a que el material a tratar ingresa y sale de la solera de manera continua sobre una cinta transportadora suficientemente resistente y termo estable, además el proceso es en serie y se controla de manera automática para toda una línea de producción. *Solera Discontinua*. Los hornos de solera discontinua son apropiados para procesos en los que el tratamiento térmico debe ser constante y se reduce a pequeños espacios. Están indicados para procesos de precalentamiento. La pieza puede cargarse en una posición y volver a retirarse, de manera manual o automática [25].

#### **2.5 Mecanismos de Transferencia de Calor**

El calor como la forma de energía se puede transferir de un sistema a otro, como el resultado de la diferencia de temperatura. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura [26].

La energía en forma de calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Se requiere la existencia de una diferencia de temperatura en losen todos los modos de transferencia de calor y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja [26].

### 2.5.1 Conducción.

Se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. La conducción sucede en los sistemas que tienen moléculas de sólidos, líquidos o gases y en los que hay un gradiente de temperatura.

En los sólidos se debe a la combinación de vibraciones de las moléculas a través de electrones libre. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, para la conducción de calor la ecuación o modelo matemático se conoce como ley de Fourier [26].

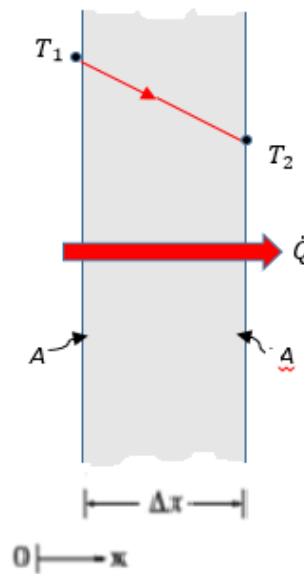
$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

[Ec. 1], [26].

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor,  $A$  es el área normal a la dirección de esa transferencia,  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura (razón de cambio de  $T$  con respecto a  $x$ ). La figura 1 muestra un esquema del mecanismo de conducción.



Figura 1. Transferencia de Calor por Conducción.



Fuente: [23]

La conductividad térmica depende del tipo de material y se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura [26].

### 2.5.2 Convección

La transferencia de calor por convección se da entre una superficie sólida, el líquido o gas que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección [26].

La transferencia de energía se debe al movimiento molecular aleatorio, es decir, por conducción; esta energía es acarreada alejándola de la superficie; a este mecanismo la transferencia de energía se debe al movimiento global o macroscópico de agregados del fluido [27].

Existen dos clases de procesos de convección que son: la convección forzada, en la que se obliga el movimiento de un fluido por una superficie debido al efecto de un agente externo tal como un ventilador o una bomba, y la convección natural o convección libre, en la que los cambios de densidad del fluido a consecuencia del intercambio libre de energía provocan un movimiento natural en el fluido; sin

importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, el modelo o la ecuación apropiado es de la forma:

$$q = h * A * (T_s - T_\infty)$$

[Ec. 2] [27].

Donde  $q$  es la relación de transferencia de calor,  $A$  es el área normal a la dirección del flujo de calor,  $(T_s - T_\infty)$  es la diferencia de temperaturas entre la superficie  $T_s$  y el flujo  $T_\infty$ , y  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, esta expresión se conoce como la Ley de enfriamiento de Newton [27].

Algunos no consideran a la convección como un mecanismo fundamental de transferencia de calor ya que, en esencia, es conducción de calor en presencia de un movimiento de fluido. Pero todavía se necesita dar nombre a este fenómeno combinado [26].

Figura 2. Transferencia de Calor de una superficie caliente hacia el aire por Convección



Fuente: [23]

### 2.5.3 Radiación.

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La transferencia de calor por radiación no requiere de un medio interventor; de hecho, es la más rápida (velocidad de la luz) y no sufre atenuación al vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra [26].

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la

radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de este tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suelen absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos [26].

El intercambio de energía radiante puede ocurrir entre dos superficies, entre una superficie y un gas o medio participante, o puede involucrar una interacción compleja entre varias superficies o fluidos participantes.

La transferencia de calor por radiación se puede tratar con razonable exactitud, si se llama cuerpo negro a un cuerpo perfectamente emisor o absorbente, la razón a la que emite energía radiante el cuerpo negro está dada por el modelo o la ecuación.

$$\frac{q}{A} = \sigma * T^4$$

[Ec. 3] [27].

En donde  $q$  es la emisión radiante,  $A$  es el área de la superficie de emisión,  $T$  es la temperatura absoluta y  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, que numéricamente es igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  [26].

El intercambio de radiación entre una superficie pequeña y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea a la pequeña se puede tratar mediante el siguiente modelo:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{arl}^4)$$

[Ec. 4] [27].

Donde  $\varepsilon$  es la Emisividad de la superficie, cuyo valor está en el intervalo  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_{arl}$  es la temperatura de la temperatura de la superficie isotérmica.

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y a la que se gana debido a la absorción por radiación, por lo que es conveniente expresar el intercambio neto de radiación  $q_{rad}$  de la forma expresada en la Ecuación 5 [27].

$$q_{rad} = h_r * A * (T_s - T_{arl})$$

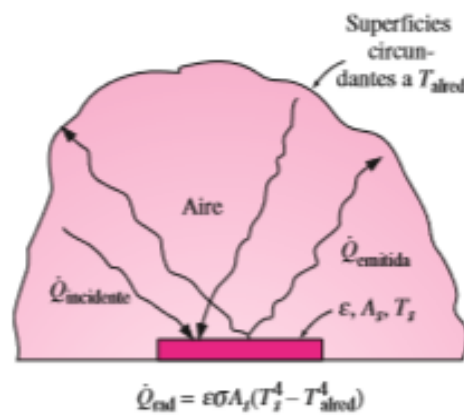
[Ec. 5] [27].

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_r$  es:

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s - T_{alr}) * (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

[Ec. 6] [27].

Figura 3. Transferencia de Calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan



Fuente: [23].

### 3 Parámetros de Diseño del Horno Eléctrico.

A continuación, se expondrán las principales variables que se consideraron para el diseño térmico y mecánico del horno eléctrico, los factores más importantes y determinantes para la selección de materiales, dimensionamiento y demás elementos constituyentes.

El equipo que se construirá será un horno eléctrico que cumpla los siguientes parámetros:

- Calentamiento por resistencias eléctricas
- Temperatura de trabajo hasta los 1200 grados Celsius de acuerdo a la disponibilidad de los elementos refractarios en el mercado nacional.
- Disponibilidad de una puerta aislante y hermética que facilite la maniobra de ingreso y salida del material (probeta) a la cámara de tratamiento térmico.

- Temperatura superficial del exterior máxima será de 35 grados Celsius con el fin de garantizar la seguridad de los operarios.
- Control eléctrico por medio de PLC, programado para mayor eficiencia y efectividad en el tratamiento térmico

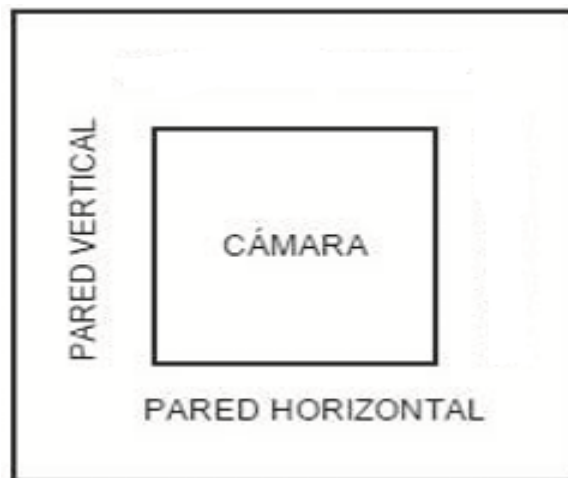
De acuerdo con los factores ya mencionados anteriormente y el cronograma de ejecución establecido para el diseño del horno eléctrico, se procederá a realizar el cálculo, dimensionamiento y selección de materiales.

### 3.1 Configuración del Horno Eléctrico.

Los materiales que se utilizarán en la construcción del horno en su mayoría se encuentran en el mercado en presentaciones que favorecen una estructura rectangular, tales como los ladrillos refractarios, fibra cerámica, papel cerámico, elementos estructurales y planchas rectangulares; por lo anterior se selecciona la configuración cúbica para mayor facilidad de construcción.

El horno eléctrico presentará una configuración a partir de las dimensiones de la cámara dispuestas hacia el exterior con paredes verticales y horizontales.

Figura 4. Configuración del horno



Fuente: Los autores.

### 3.2 Características de los materiales utilizados en las capas del revestimiento

### **3.2.1 Ladrillo refractario UA - 23**

Clasificación NTC -815, ASTM C-155

Es un ladrillo refractario aislante utilizado para la construcción de paredes interiores y revestimientos de hornos. Su característica principal es la máxima temperatura de servicio recomendado 1717 °C, pero además posee baja conductividad térmica para ahorrar energía, baja densidad y una elevada resistencia mecánica y química.

### **3.2.2 Mortero refractario Universal**

Clasificación NTC - 765, NTC – 851

Resiste la acción del fuego sin alterarse, al estar elaborados con cementos aluminosos otorga unas características complementarias como el fraguado rápido, la resistencia en ambientes ácidos y la resistencia a cloruros y sulfatos.

Se aplica para la construcción y reparación de elementos sometidos a calor como hornos, chimeneas etc. Está diseñado como mortero para montar y rejuntar cerámica refractaria, terracotas o bloques de hormigón que van a estar sometidos a altas temperaturas. Sus características técnicas más sobresalientes son: temperatura máxima de operación hasta 1600°C, resistente a los sulfatos y cloruros, alta resistencia térmica, resistente a los ácidos y su espesor de aplicación es máximo de 2cm por capa [28], [29].

Se utilizará el mortero refractario silico – aluminoso SUPERAEROFRAX para el pegado del papel refractario escogido para la elaboración del revestimiento del horno eléctrico. La característica principal es la temperatura máxima de operación es de 1600°C y su fácil aplicación sobre el papel y tablas cerámicas.

### **3.2.3 Fibra cerámica**

Ceramic Fiber Blanket

La fibra de cerámica es un material refractario ligero fabricado con fibras de alúmina y sílice, presentan alta resistencia a elevadas temperaturas.

Pueden ser sometidas a temperaturas que varían de los 1000 °C a los 1500°C sin modificar su estructura, soportando calentamientos y enfriamientos, choque térmico y fenómenos diferentes inducidos por altas temperaturas.

Se caracterizan por su baja densidad, su excelente resistencia al choque térmico y baja conductividad térmica. Permite estructuras ligeras, facilidad en su fabricación y puesta en servicio [28].

### 3.2.4 Tabla cerámica

Tabla LD 2300

El tablero de fibra cerámica Nutec Fibratec es un material refractario ligero procesado con fibras de sílice de alúmina para aplicaciones a temperaturas de hasta 1650 ° C.

Nutec Fibratec es un producto formado por vacío que resiste velocidades de gas más altas que la manta de fibra de cerámica. Es ideal para el horno, el conducto de la caldera y el revestimiento de la pila debido a su baja conductividad térmica y bajo almacenamiento de calor, lo que permite tiempos de ciclo más cortos y un acceso más rápido para el mantenimiento [28].

Tabla 1. Propiedades de los materiales de revestimiento

<b>PROPIEDADES DE LOS MATERIALES</b>				
<b>Materiales</b>	<b>Propiedades</b>			
	<i>Temperatura Máxima de servicio (°C)</i>	<i>Calor Específico (J/Kg. K)</i>	<i>Conductividad Térmica (W/m*K)</i>	<i>Densidad (Kg / m<sup>3</sup>)</i>
Tabla cerámica LD 2300	1430	1130,43	0,17	160
Papel cerámico FIBL TP-23	1430	1130,43	0,22	256,29
Lámina de acero inoxidable Calibre 18	35	500	28	7,93E+03

Fuente: [28].

### 3.3 Cálculo térmico de los espesores de pared.

Para determinar el espesor de cada una de las capas del revestimiento, se realiza el cálculo y estudio de la transferencia de calor en estado estacionario a lo largo de la pared del horno, de acuerdo con los requerimientos: la temperatura máxima de

operación dentro de la cámara es de 1370 °C, temperatura superficial exterior es de 35°C y temperatura ambiente promedio de la ciudad de Bogotá 18°C.

### 3.3.1 Disposición de los Materiales en las Capas de Revestimiento.

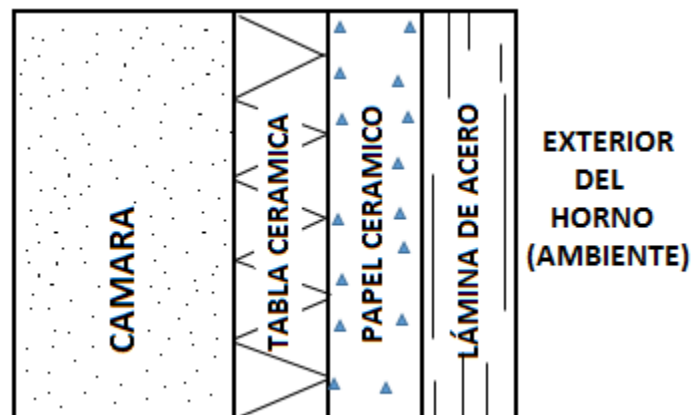
Para elegir la disposición de los materiales en las capas de revestimiento se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

- Los materiales de cada capa deberán soportar la temperatura máxima de operación correspondiente a su ubicación formando la pared de revestimiento.
- Se requiere lograr una radiación uniforme, por lo cual la disposición de los materiales se determina por las siguientes propiedades: temperatura máxima de operación, conductividad térmica y densidad decreciente, ya que el aislamiento se toma desde la cara caliente en el interior del horno, hasta la cara fría en el exterior del mismo [30].

A continuación, se mostrará la disposición de los materiales de revestimiento:

Dos (2) placas de tabla cerámicas, una (1) una tabla de papel cerámico y una (1) lámina de acero inoxidable.

Figura 5. Disposición de los materiales de revestimiento



Fuente: los autores.

### 3.3.2 Cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes del revestimiento.

Para efectuar el cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes de revestimiento, se realiza un análisis de la transferencia de calor unidimensional en



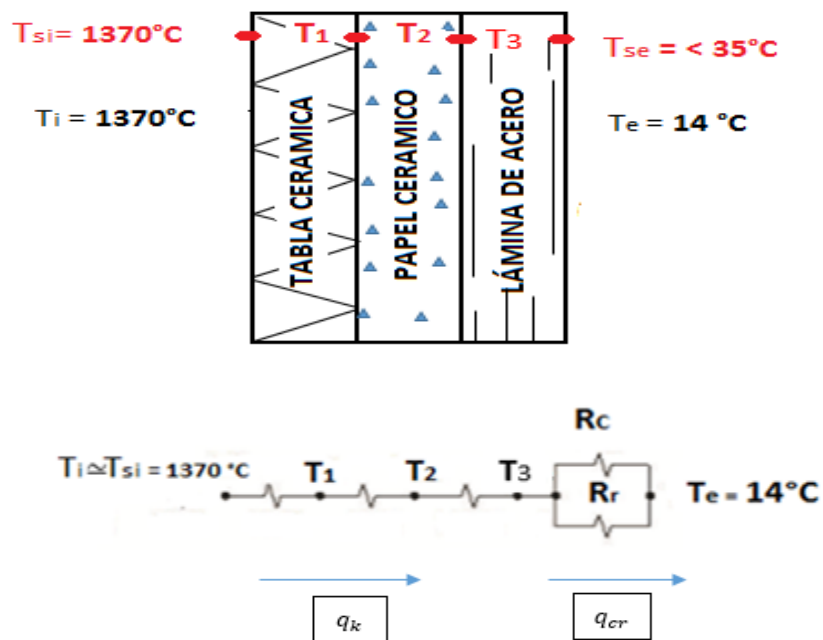
estado estacionario en una pared compuesta, considerando que la temperatura superficial interior del revestimiento en la cara de la tabla cerámica es de  $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura superficial exterior del revestimiento en la lámina metálica es menor de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se obtiene los datos de la temperatura promedio en la ciudad de Bogotá de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  (obtenida por el IDEAM año 2015).

No se realiza un análisis de transferencia de calor por convección, ya que se utiliza conductividad efectiva correspondiente a recintos cerrados. Se considera un circuito térmico en el que las resistencias por conducción corresponden a las capas del revestimiento en serie, mientras que entre la superficie exterior del revestimiento y el ambiente se tienen dos resistencias en paralelo correspondientes a convección y radiación.

Se encuentra un flujo de calor en las capas del revestimiento correspondiente a la conducción, el otro corresponde a la radiación y convección en el exterior del revestimiento.

En la siguiente figura se muestra las variables que intervienen en el cálculo y un esquema del modelo utilizado.

Figura 6. Esquema del modelo de transferencia de calor



Fuente: Los autores.

Ti: Temperatura del interior de la cámara

Tsi: Temperatura superficial interior del revestimiento  
T1: Temperatura en la cara de la tabla cerámica  
T2: Temperatura en la cara de la tabla cerámica y el papel  
T3: Temperatura de la cara del papel y la lámina de acero  
Tse: Temperatura superficial exterior del revestimiento  
Te: Temperatura exterior del ambiente  
qk: Flujo de calor perdido por conducción  
qcr: Flujo de calor perdido por convección y radiación  
Rk1: Resistencia térmica de conducción de la tabla cerámica  
Rk2: Resistencia térmica de conducción del papel cerámico  
Rk3: Resistencia térmica de la lámina de acero  
Rc: Resistencia térmica de convección entre la superficie exterior y el ambiente  
Rr: Resistencia térmica de radiación de la superficie exterior hacia el ambiente

### 3.3.3 Consideraciones para el cálculo.

La consideración que realizamos corresponde al flujo de calor perdido por conducción a través de las paredes  $q_k$ , es igual al flujo de calor que se pierde por convección-radiación desde la superficie exterior hacia el ambiente  $q_{cr}$  según la ecuación 7 [30].

$$q_k = q_{cr}$$

[Ec. 7] [30].

Para el cálculo se tiene como objetivo que la temperatura superficial exterior del revestimiento  $T_{se}$  sea menor a  $35^{\circ}\text{C}$ , para esto no es necesario realizar variación en los espesores de las capas de revestimiento para que  $T_{se}$  sea lo más próximo.

Los espesores de las capas de revestimiento tienen una sola disposición, ya que se consideran medidas estándares en el mercado.

Se inicia el proceso asumiendo una temperatura superficial exterior  $T_{sea}$ . (Temperatura en la cara fría de la lámina de acero); con el valor conocido de la temperatura interior del revestimiento  $T_{si}$  (temperatura en la cara caliente de la tabla cerámica) se realiza el cálculo del flujo de calor  $q_k$ , después de haber calculado el flujo de calor anteriormente nombrado se utiliza la ecuación del calor perdido por

convección-radiación  $q_{cr}$  para recalcular la temperatura superficial del revestimiento exterior  $T_{se}$ , una vez realizado este cálculo se procede a calcular nuevamente el calor  $q_k$  hasta que la temperatura calculada sea lo más próxima a la temperatura asumida [31]. A continuación, se realiza el desarrollo de los cálculos correspondientes a los flujos de calor que serán utilizados en el proceso.

### 3.3.4 Calor perdido por conducción.

El cálculo de del calor perdido  $q_k$  está determinado por:

$$q_k = \frac{T_{si} - T_{se}}{\sum = \frac{L_i}{k_i}}$$

[Ec. 8] [30].

Encontramos que:

$T_{si}$  = Temperatura superficial en el interior del horno

$T_{se}$  = Temperatura superficial exterior del revestimiento (asumida o calculada)

$L_i$  = Espesor de la capa de revestimiento

$k_i$  = Conductividad térmica promedio de cada material

El calor perdido por conducción está dado por:

$$q_k = \frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{1}{h_2 A}}$$

[Ec. 9], [30].

$$q_k = 4151,19 \frac{W}{m^2}$$

[Ec. 10], [30].

### 3.3.5 Calor perdido por convección-radiación.

El calor que se pierde por convección – radiación  $q_{cr}$  del revestimiento exterior hacia los alrededores está dado por:

$$q_{cr} = h_{cr} * (T_{se} - T_e)$$

[Ec. 11] [30]

$h_{cr}$  = Coeficiente combinado de convección – radiación  $h_{cr} = h_c + h_r$

$h_c$  = Coeficiente de convección calculado con la ec. [20].

$h_r$  = Coeficiente de radiación,  $h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_{air}) * (T_s^2 + T_{air}^2)$  para este caso se asume que  $T_\infty \approx T_{air}$

$\varepsilon = 0,88$ ; Emisividad de la superficie exterior

$\sigma$  = Constante de Boltzmann  $5,67e-08$  [W/m<sup>2</sup> \* K]

$T_\infty$  = Temperatura promedio anual de la ciudad de Bogotá determina como:

$$T_\infty = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

[Ec. 12] [30].

$$T_{maxB} = 24^\circ\text{C}$$

$$T_{minB} = 8,5^\circ\text{C}$$

Obtenida de las publicaciones meteorológicas dadas por el IDEAM año 2015

$$T_\infty \approx 14^\circ\text{C}$$

$T_{se}$  = Temperatura superficial exterior del revestimiento (calculada).

### 3.3.6 Calor que se pierde al ambiente por convección y radiación es:

$$q_{cr} = \frac{T_{se} - T_\infty}{R_{cr}}$$

[Ec. 13] [31]

$$q_{cr} = 436046,51 \frac{W}{m^2}$$

Donde  $R_{cr}$  Es la resistencia de convección-radiación.

$$R_{cr} = \frac{1}{h_{cr}}$$

[Ec. 14] [31].

$$R_{cr} = 0,000043 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para continuar con el cálculo se procede a igualar las pérdidas de calor por convección – radiación según la ecuación:

$$q_r = q_{cr}$$
$$q_K = \frac{T_{se} - T_{\infty}}{R_{cr}}$$

[Ec. 15] [31].

De la ecuación [12] se despeja la Temperatura superficial exterior para ser calculada  $T_{se}$ .

$$T_{se} = \frac{q_k}{h_{cr}} + T_{\infty}$$

[Ec. 16] [31].

El valor de la temperatura superficial exterior del revestimiento calculado  $T_{sec}$  debe ser lo más próximo a la temperatura asumida  $T_{sea}$ .

$$T_{sec} = 306,10 \text{ K}$$

$$T_{sea} = 308,15 \text{ K}$$

A continuación, se presenta el modelo final luego de no variar los espesores del revestimiento, en la tabla 2. Se indican los espesores para cada material, su conductividad térmica y su resistencia térmica.

Tabla 2. Dimensiones y propiedades de los materiales.

Dimensiones y propiedades de los materiales a utilizar				
Materiales	Propiedades			
	Unidades	Espesor (m)	Conductividad Térmica (W/m*K)	Resistencia Térmica ( $m^2 \cdot K/W$ )
Tabla cerámica LD 2300	2	0,0508	0,17	0,32
Papel cerámico FIBL TP-23	1	0,005	0,22	0,25
Lámina de acero inoxidable Calibre 18	1	0,00122	28	4,84E-04
RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL				0,57

Fuente: los autores. [28], [26]

Se establecen las dimensiones de la cámara interior en 0,001864 m por cada lado con un volumen de  $0.0064 m^3$  con los espesores del revestimiento mencionados en la tabla anterior.

Los resultados obtenidos al final del proceso de cálculo muestran que el valor de la  $T_{sec}$  y  $T_{sea}$  es muy cercano; por ende, no es necesario variar los espesores del revestimiento. Se considera que la temperatura es segura para el operario.

### 3.3.7 Resultado y perfil de temperaturas.

Los resultados finales de las temperaturas calculadas para cada superficie entre los materiales se muestran en la siguiente tabla.

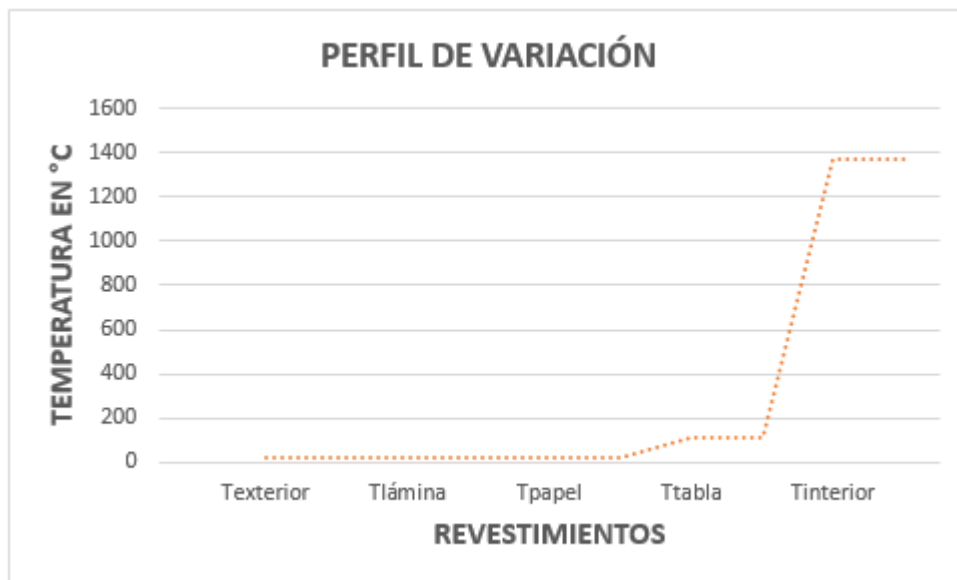
Tabla 3. Temperaturas calculadas.

	TEMPERATURA EN °C
$T_{interior}$	1370
$T_{tabla}$	109
$T_{papel}$	14,05
$T_{lámina}$	14,02
$T_{exterior}$	14

Fuente: Los autores.

A continuación, se muestra el perfil de variación de las temperaturas desde la superficie interior de la cámara a 1370 °C hasta la capa exterior.

Gráfica 2. Perfil de temperatura en las paredes del revestimiento.



Fuente: los autores.

### 3.4 Calor total perdido a través de las paredes

Teniendo los espesores de los materiales de revestimiento se inicia el cálculo del calor perdido a través de las paredes para el cálculo de la potencia.

#### 3.4.1 Calor perdido a través de las paredes verticales.

Para iniciar el cálculo a través de las paredes verticales depende del calor de conducción calculado anteriormente  $q_k$  y el área promedio de transferencia de calor  $A_{m1}$  se calcula utilizando la ecuación:

$$Q_1 = q_k * A_m$$

[Ec. 17] [30]

El área de transferencia de calor para hornos pequeños y medianos se determina como la media geométrica entre el área de la cámara y el área de la última capa de la pared compuesta [30].

$$A_m = \sqrt[2]{A_i * A_e}, \quad \text{si } \frac{A_e}{A_i} > 2$$

[Ec. 18] [30]

Dónde:

$A_m$  = Área promedio de transferencia de calor

$A_i$  = área de la cámara interior, para una sola pared es  $0,039 \text{ m}^2$

$A_e$  = área exterior para una sola pared es  $0,09 \text{ m}^2$

Por lo tanto, el área total para determinar el calor perdido por las cuatro paredes verticales según la ecuación 18:

$$A_m = 0,06 \text{ m}^2$$

Entonces con la ecuación 17 el calor perdido a través de las paredes verticales  $Q_1$  corresponde a:

$$Q_1 = 249 \text{ [W]}$$



### 3.4.2 Calor perdido a través de las paredes horizontales

También hay calor perdido a través de las paredes horizontales, es decir, la base y el techo de la cámara, para estos casos el análisis de la transferencia de calor hace referencia a otros modelos.

El calor perdido por la superficie horizontal superior  $Q_2$  está dado por:

$$Q_2 = h_{cr} * A_m * (T_{sc} - T_{\infty})$$

[Ec. 19] [30]

Donde:

$$h_{cr} = \frac{Nu * k}{L}$$

[Ec. 20] [32]

Para los valores determinados de número de Nusselt, conductividad térmica y espesor de la pared se tiene:

$$h_{cr} = 16,96 \left[ \frac{W}{m^2} * K \right]$$

Para este caso el número de Nusselt y el de Grashof se calculan de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$Nu = 0,54 * Ra_L^{\frac{1}{4}} = 0,54 * (Gr * Pr)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = 26,10$$

[Ec. 21] [26]

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sc} - T_{\infty}) * L_3}{\nu^2}$$

[Ec. 22] [26]

$$Gr = 13,73 * 10^6$$

La longitud característica  $L$  para la pared horizontal superior es de 0,3 m.

Las propiedades son evaluadas a la temperatura promedio  $T_p = \frac{T_{sec} - T_{\infty}}{2}$

Al reemplazar los valores en la ecuación 2.13 correspondiente al calor perdido por la pared horizontal superior  $Q_2$  se obtiene el resultado de:

$$Q_2 = 16,59 \text{ W}$$

El cálculo para el calor perdido por la pared horizontal inferior  $Q_3$ , está dado como en el caso anterior, ecuación 18.

$$Q_3 = h_{cr} * A_m * (T_{sc} - T_{\infty})$$

Donde el número de Nusselt se calcula de acuerdo con la ecuación 20.

$$h_{cr} = \frac{Nu * k}{L}$$

$$h_{cr} = 16,96 \left[ \frac{W}{m^2} * K \right]$$

Nuevamente las propiedades se evalúan a la temperatura promedio  $T_p$  y la longitud característica de la misma forma y valores del caso anterior.

El número de Nusselt varía, pero el Grashof es el mismo de la ecuación 2.16

$$Nu = 0,27 * Ra_L^{\frac{1}{4}} = 0,27 * (Gr * Pr)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = 13,05$$

[Ec. 23] [26]

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{sc} - T_{\infty}) * L_3}{\nu^2}$$

$$Gr = 13,73 * 10^6$$

Al reemplazar los valores en la ecuación 2.13 correspondiente al calor perdido por la pared horizontal inferior  $Q_3$  es:

$$Q_3 = 8,29 \text{ W}$$

El calor perdido a través de las paredes del revestimiento  $Q_k$  hacia el ambiente está dado por la ecuación:

$$Qk = Q1 + Q2 + Q3$$

$$Qk = 273,88 \text{ W}$$

### 3.5 Cálculo del Calor Total Acumulado

El calor acumulado que se encuentra en cada uno de los materiales desde la temperatura ambiente hasta la temperatura promedio entre la cara caliente y fría se determina por la siguiente relación:

$$Q_{acc} = \sum_i \rho_i * \forall_i * C_{pi} * \left( \frac{T_{cc} + T_{cf}}{2} - T_{amb} \right)$$

[Ec. 24] [30]

Donde:

$Q_{acc}$  : Calor total acumulado en las paredes del revestimiento, en la cámara y en la carga.

$\rho_i$  : Densidad de cada uno de los materiales

$C_{pi}$  : Calor específico de cada uno de los materiales

$\forall_i$  : Volumen que ocupa cada material

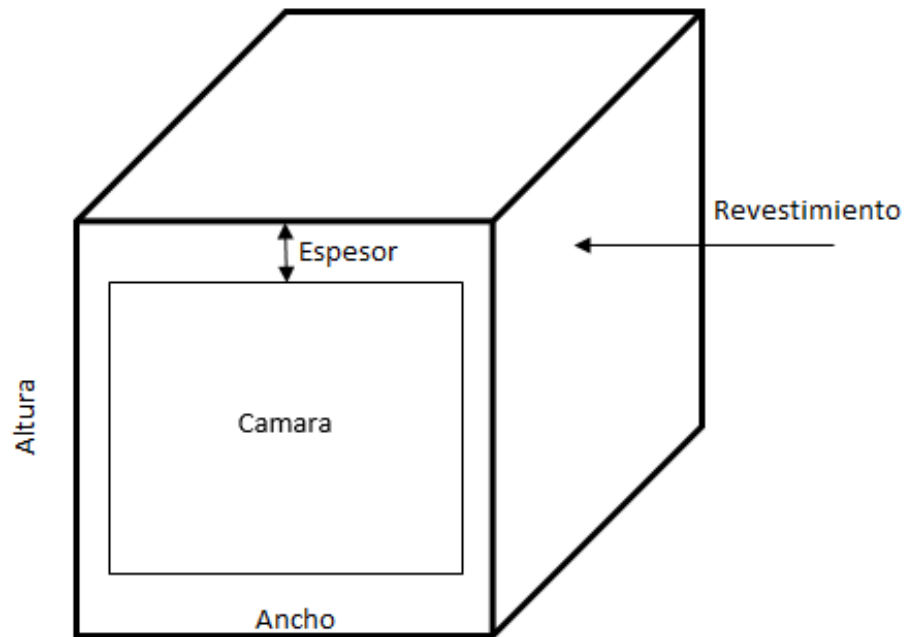
$T_{cc}$  : Temperatura en la cara caliente para cada material

$T_{cf}$  : Temperatura en la cara fría para cada material

$T_{amb}$  : Temperatura ambiente, 16 °C.

Las temperaturas de la cara caliente y fría para cada material se obtienen del cálculo perdido por conducción mientras que las densidades y el calor específico se obtienen de la tabla 1. Para el cálculo del volumen de cada uno de los materiales se realiza de acuerdo con el esquema que se presenta en la figura 13 considerando el espesor respectivo para cada una de las paredes.

Figura 7. Esquema para el cálculo del volumen.



Fuente: los autores.

La siguiente tabla nos muestra el cálculo del calor acumulado en las paredes del revestimiento  $Q_{acc1}$ .

Tabla 4. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento

<b>Materiales</b>	<b>Volumen ( m<sup>3</sup> )</b>	<b>Calor Específico (J/Kg. K)</b>	<b>T<sub>p</sub> (K)</b>	<b>Densidad (Kg / m<sup>3</sup> )</b>	<b>Calor Acumulado</b>
Tabla cerámica LD 2300	4,57E-03	1130,43	1001,15	160	6,02E+05
Papel cerámico FIBL TP-23	4,50E-04	1130,43	320,65	256,29	6,19E+03
Lámina de acero inoxidable Calibre 18	1,10E-04	500	7930	7,93E+03	15,24
				<b>Qacc1</b>	<b>6,10E+05</b>

Fuente: Los autores.

En la tabla 5 se muestra el cálculo de calor acumulado o transmitido a la cámara y la carga  $Q_{acc2}$ , donde se tiene en cuenta el calor acumulado en el interior de la cámara y un volumen para la carga del 75% del volumen de la cámara.

Tabla 5. Cálculo del calor acumulado en el revestimiento

<b>Materiales</b>	<b>Volumen ( m<sup>3</sup> )</b>	<b>Calor Específico (J/Kg. K)</b>	<b>T<sub>p</sub> (K)</b>	<b>Densidad (Kg / m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Acumulado</b>
Camara Argon	0,027	0,074	1634,15	1,37	4,48
Carga Acero (Probeta)	1,01E-03	460	1634,15	7850	5,97E+06
				<b>Qacc2</b>	<b>5,98E+06</b>

Fuente: Los autores.

Al obtener los valores de  $Q_{acc1}$  y  $Q_{acc2}$  se determina el calor total acumulado  $Q_{acc}$ :

$$Q_{acc} = 6,59 * 10^8 [J]$$

Se considera que el tiempo estimado para alcanzar el calentamiento uniforme en el interior de la cámara es de 180 minutos, la cámara y la carga se obtiene al dividir el calor acumulado por este tiempo.

$$\dot{Q}_{acc} = \frac{Q}{t} [J/s]$$

[Ec. 25] [26]

$$\dot{Q}_{acc} = 6,10 [KW]$$

### 3.6 Determinación de la Potencia Eléctrica.

La potencia que las resistencias eléctricas deben suministrar, además de suplir la energía dirigida al tratamiento térmico, también debe entregar la energía correspondiente a las pérdidas de calor a través de las paredes del horno, es decir, la energía para calentar todas las capas del horno y el aire en el interior de la cámara. Por lo tanto, la potencia total requerida es:

$$P = \dot{Q}_{acc} + Qk$$

[Ec. 26] [30]

Donde:

P: Es la potencia total requerida para el horno

$\dot{Q}_{acc}$  : Es el calor total acumulado por unidad de tiempo

$Qk$ : Es el flujo de calor que se pierde hacia el ambiente

Por lo tanto, la potencia total es:

$$P \cong 7 \text{ KW}$$

Tabla 6. Resultados del cálculo térmico

Resistencia Térmica Total	0,57 ( $m^2 \cdot K/W$ )
Cálculo del calor total acumulado en el revestimiento	$6,59 \cdot 10^8 [J]$
Calor perdido a través de las paredes del revestimiento hacia el ambiente	273,88 W
Potencia Eléctrica	7 KW

Fuente: Los autores.

### 3.7 Cálculo y Selección de las Resistencia Eléctricas

El calentamiento por resistencias eléctricas se fundamenta en el efecto joule, en donde la potencia eléctrica absorbida por los elementos resistivos es disipada al medio en forma de calor.

$$Q = I^2 * R * t$$

[Ec. 27] [30]

Donde.

$Q$  = Calor disipado

$R$  = Resistencia del elemento calefactor.

$I_c$  = Intensidad de corriente a través del elemento calefactor.

$t$  = Tiempo

### 3.8 Fórmulas y Consideraciones a Utilizar para el Cálculo

Depende de la disposición de las resistencias y de la temperatura máxima para alcanzar la potencia máxima en el interior de la cámara del horno eléctrico de calentamiento por resistencias.

La figura 4 del anexo 5 muestra el valor de dicha potencia máxima recomendada para cuatro tipos de elementos calefactores, al referirnos a la curva (a) de la figura y con el valor de la potencia del horno que ya es conocida [12KW] y la temperatura máxima 1370 °C se obtiene que el área mínima que debe estar por las resistencias eléctricas es de  $0,55m^2$  aproximadamente.

Las fórmulas que se usan para determinar el diámetro del alambre de una sola resistencia son:

$$R_{20} = \rho_R * \frac{4 * L_R}{\pi * d^2}$$

[Ec.28] [33]

La resistencia de un conductor  $R_{20}$  (resistencia del elemento calefactor a 20°C) de diámetro  $d$ , es proporcional a su longitud  $L_R$  e inversamente proporcional a la sección transversal. La constante de proporcionalidad  $\rho_R$  es la resistividad del material y es dependiente de la temperatura. La unidad de la resistividad en el SI está dada en [ $\Omega mm^2 m^{-1}$ ].

Como la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal se considera el coeficiente de temperatura  $C_t$  que se define como la relación entre la resistencia a una cierta temperatura  $R_t$  y la resistencia a 20°C  $R_{20}$  y su valor se encuentra en tablas para varias aleaciones.

$$C_t = \frac{R_t}{R_{20}}$$

[Ec. 29] [33]

El área superficial radiante  $A_{SR}$  de las resistencias en  $[cm^2]$  es:

$$A_{SR} = \pi * d * L_R * 10$$

[Ec. 30] [33]

La carga específica del elemento de calefacción  $p [W/cm^2]$ , está definida como la relación entre la potencia disipada por el conductor y el área superficial del radiante que, para la potencia máxima las mismas disposiciones del conductor se puede determinar su valor para las diferentes aleaciones:

$$p = \frac{P_d}{A_{SR}}$$

[Ec. 31] [33]

Combinando las anteriores ecuaciones se llega a la relación para calcular el diámetro del alambre  $d$ .

$$d = \sqrt{\frac{4 * P * \rho}{\pi^2 * p * R_{20} * 10}}$$

[Ec. 32] [33]



### 3.9 Disposición y Cálculo de las Resistencias.

Para la potencia máxima se determinó el área mínima que debe cubrirse con las resistencias es de  $0,034 \text{ m}^2$ . De acuerdo con lo anterior y el valor fijado para las dimensiones de la cámara. Se considera que la disposición de las resistencias se disponga en las paredes laterales del horno, es siempre lo recomendable.

Los sistemas de calentamiento trifásicos son los más eficientes cuando funcionan con cargas balanceadas, la conexión de las resistencias se realizará en delta balanceado con una alimentación de 220V.

Con los parámetros especificados se procede a calcular la potencia disipada por cada elemento resistivo considerando que el sistema es balanceado, por lo tanto, todas las resistencias son iguales, por lo cual, para un sistema trifásico la potencia disipada por una resistencia es:

$$P_t = 1.73 * V_L * I_L$$

[Ec. 33] [33]

Donde:

$P_t$  = Potencia total del horno, 7 [KW]

$V_L$  = Voltaje entre fases, 220 [V]

$I_L$  = Intensidad corriente en cada línea 1.73 [A]

$$I_L = 1.73 * I_p$$

[Ec. 34] [33]

$I_p$  = Intensidad de corriente que pasa por cada resistencia

Despejando la  $I_L$  de la ecuación 36.

$$I_L = \frac{P_t}{1.73 * V_L}$$

Se procede a reemplazar los valores numéricos y se obtiene:

$$I_L = 18,39 \text{ [A]}$$

$$I_p = 10,63 \text{ [A]}$$

El valor de la resistencia está dado por la ecuación:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{3 * V_L^2}{P_t}$$

[Ec. 35] [33]

$$R_1 = 20,74 \Omega$$

Potencia disipada por cada elemento:

$$P = (I_p)^2 * R_1$$

[Ec. 36] [33]

$$P = 2,34 \text{ [KW]}$$

Para el cálculo del diámetro del alambre de resistencia se necesita determinar el tipo de aleación para la resistencia.

El material seleccionado, tomando en cuenta la temperatura que se necesita alcanzar en la cámara del horno, es el Kanthal-A1 que tiene una resistividad de  $1,05 \text{ } [\Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}]$ , puede trabajar hasta una temperatura de elemento de  $1400 \text{ } ^\circ\text{C}$ , por lo tanto, el diámetro del alambre al reemplazar los valores en la ecuación 34.

$$d = 1,9 \text{ [mm]}$$

El diámetro que se consigue comercialmente es de 2 mm, por lo cual se opta por seleccionar este. Se procede a calcular los valores de longitud total del alambre, diámetro de las espiras y el paso entre espiras, que son aspectos fundamentales en la construcción de las resistencias. La longitud total del alambre por cada resistencia está dada por la siguiente ecuación:

$$L_T = \frac{P}{\pi * d * \rho}$$

[Ec. 37] [33]

Pero se puede obtener el valor de un valor de una forma más rápida:

$$L_T = \frac{R_1}{\Omega/m}$$

[Ec. 38] [33]

$$L_T = 12,96 [mm]$$

Posteriormente se calcula el diámetro de las espiras, en la figura 14 se obtiene los valores recomendados para el cálculo del diámetro de cada espira:

Como las aleaciones kanthal pueden funcionar a temperaturas más altas que las aleaciones nikrothal, se puede obtener una mayor carga superficial sin poner en riesgo la vida. El diseño de elementos también es de gran importancia. Cuanto más libremente irradie la forma del elemento. Cuanto mayor sea la carga superficial máxima. Por lo tanto, el elemento de tipo ROB (varilla sobre doblez) (alambre pesado corrugado montado en la superficie). Se puede cargar el más alto. Seguido por el elemento de tira corrugado.

Los elementos en espiral en los tubos de cerámica se pueden cargar más altos que los elementos en espiral en los surcos. Los valores en la figura 4 del anexo 2 se dan para las siguientes condiciones de diseño.

Elemento A

Alambre y elemento de tira en surcos. Diámetro del alambre min. 3 mm. 0,12 en el espesor de la tira min.2 mm. 0.08 in

Elemento B

Elemento de alambre en el tubo de cerámica. Diámetro del alambre min. 3 mm 0.12 in [33].

$$D = (5 - 8)d$$

[Ec. 39] [33]

Adicional se tiene una fórmula para el cálculo del paso entre espiras  $S$ :

$$s = (2 - 3)d$$

[Ec. 40] [33]

Tomando los valores intermedios se tiene el diámetro de la espira  $D$  y el arrojan los siguientes datos:

$$D = 6 * d = 12 [mm]$$

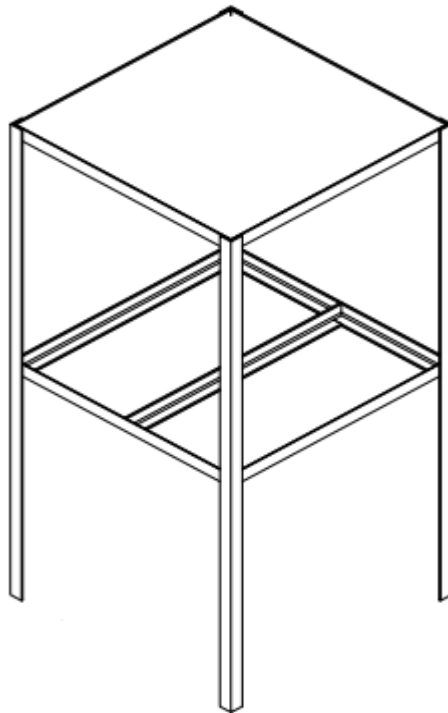
$$s = 2 * d = 4 [mm]$$

### 3.10 Cálculo de la estructura metálica y selección del PLC

Para el diseño y cálculo de la estructura metálica se determina utilizar el acero A36 por sus propiedades físicas, mecánicas y fácil obtención en el mercado nacional.

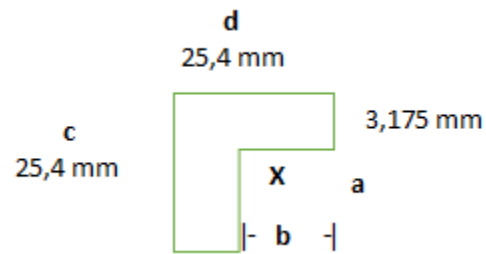
Se realiza el cálculo de la estructura hallando el peso de una columna y se multiplica por 4 para hallar el peso total de toda la estructura, luego se halla el peso total del horno y se le suma un peso adicional para dejarle un factor de seguridad. Posteriormente se suma el peso total del horno más el peso total de la estructura para determinar el esfuerzo.

Figura 9. Esquema de la estructura soportante



Fuente: Los autores.

Figura 9. Ángulo que se utiliza para el cálculo



Fuente: Los autores.

$$a = 22,225 \text{ mm} = 0,022 \text{ m}$$

$$a = b \longrightarrow x = a * b$$

$$\text{Área } x = 0,00049 \text{ m}^2$$

$$\text{Área total sección ángulo } (A_{sec. \text{ ang}}) = \text{Área total } (A_t) - \text{Área } x (A_x)$$

$$\text{Área total } (A_t) = c * d = 0,645 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Área total sección ángulo } (A_{sec. \text{ ang}}) = 0,152 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Densidad A36} = 7860 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Altura} = 1000 \text{ mm}$$

$$\text{Peso } (w) = m * \text{Gravedad} = 11.73 \text{ N}$$

$$w = 46.92 \text{ N (Peso total de las 4 columnas)}$$

$$\text{Volumen } b = \text{Área sección Ang.} * \text{Largo} = 0,076 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Masa b = 0,59 Kg

Peso b = 5.86 N \* 8 Travesaños = 46.92 N

$$w_{total} = 93.76N$$

Fuerza a compresión sobre cada ángulo

$$F_c = (w_t/4).$$

[Ec. 41] [34]

Peso del Horno = 20 Kg

Gravedad =  $9.81 \text{ m/s}^2$

Peso Total = 93.76N

Total de Columnas = 4

$$F_c = 72,49N$$

Acero estructural = 370 MPa

Área total sección ángulo ( $A_{sec. \text{ ang}}$ ) =  $0,152 * 10^{-3} \text{ m}^2$

$$F = (370 * 10^6 Pa) * (0,152 * 10^{-3} \text{ m}^2)$$

$$F_{limite} = 56240 \text{ N}$$

Factor de Seguridad  $n = F_{\text{limite}} / F_c$

[Ec. 42] [34]

$n = 772$

Teniendo en cuenta los cálculos anteriores la estructura debe ser fabricada con las siguientes especificaciones, Angulo estructural A36 de 1" de ancho x 1/8" de espesor con una longitud de 1000mm para cada columna, en las uniones de la estructura se aplica soldadura 6013, se utiliza una tabla de madera de 1/2" de espesor para soportar el horno, y también nos servirá como aislante eléctrico y con estas especificaciones se garantiza que la estructura soporta un peso mayor a 93.76N.

Para este proyecto se selecciona un PLC Simatic 1200 marca Siemens ya que cumple con los requisitos y las necesidades que se generaron en este proyecto. Se destacó las siguientes características técnicas como:

- Alta capacidad de procesamiento
- Calculo de 64 bits
- Interfaz Ethernet / PROFINET integrado
- Programación mediante la herramienta de software STEP 7 Basic V13 para la configuración y programación no solo del S7-1200 si no de manera integrada los paneles de la gama Simatic Basic Panels.
- Tiene 5 modelos diferentes de CPU y se pueden expandir a las necesidades y requerimientos de las maquinas [35].

Se selecciona un relé térmico de sobrecarga Sirius 3RU11 marca siemens, una termocupla tipo K para el control de temperatura sobre la pieza.

### **3.11 Selección de la atmósfera**

Para este proyecto se ha determinado utilizar el gas argón para la protección superficial de la pieza a tratar para evitar delaminaciones o formaciones de cascarilla. El argón en estado líquido o gaseoso no es corrosivo, ni inflamable, ni tóxico. Los riesgos más importantes que se presentan en la utilización del argón es el de asfixia, mareo, vomito, confusión y hasta pérdida de la conciencia produciendo el desplazamiento del oxígeno del aire de la atmósfera. Cuando el argón líquido se evapora, produce un vapor frío, más pesado que el aire, y tiende acumularse en los puntos más bajos del suelo. La existencia de este gas, así como la falta de oxígeno, no son detectadas por los sentidos humanos. El argón es un elemento que se puede conseguir fácilmente en el mercado ya que se utiliza bastante en el área industrial

para la protección de metales [36]. Para llegar a esta elección en cuanto a la atmósfera a considerar en este diseño, se realizó un cuadro comparativo que está relacionado en la tabla 7.

La implementación de la atmosfera controlada ayuda a proteger la pieza a tratar para evitar la pérdida de material, delaminaciones y descarburación en el material en comparación con un horno comercial.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los gases

ELEMENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Nitrogeno. (gas inerte)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sirve para refrigeración</li> <li>* Se utiliza para la fabricación de piezas eléctricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* No es utilizado para protección de atmosferas controladas a altas temperaturas, ya que no es compatible con otros elementos químicos como: molibdeno, cromo, titanio y culombio porque reacciona de forma explosiva.</li> <li>* Mal conductor de calor</li> </ul>
<b>Hidrogeno (gas reactivo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Se halla en todos los componentes de la materia viva</li> <li>* Se utiliza como refrigerante en rotor de generadores eléctricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* No se utiliza para la protección de atmosferas controladas a altas temperaturas, ya que es inflamable.</li> <li>* Mal conductor de calor</li> <li>*Es utilizado para la reducción de minerales metálicos</li> </ul>
<b>Argon (gas inerte)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* No forma compuestos químicos</li> <li>* No es corrosivo</li> <li>* Se usa para protección de soldaduras</li> <li>* Se utiliza para tratamientos térmicos</li> <li>* Fácil obtención en el mercado nacional</li> <li>* Es amigable con el medio ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Su mala manipulación puede generar asfixia, mareo, vomito, confusión y hasta pérdida de la conciencia produciendo el desplazamiento del oxígeno del aire de la atmósfera</li> </ul>
<b>Helio (gas noble)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sirve para reemplazar el hidrogeno en altas temperaturas</li> <li>*No corrosivo, no reactivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Se licua a bajas temperaturas y altas presiones para obtener</li> </ul>
<b>GLP (derivado del petroleo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Su precio no es elevando</li> <li>* Fácil obtención en el mercado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Genera oxidaciones, carburización en los metales dependiendo la temperatura.</li> <li>* Genera monoxido y dióxido de carbono</li> </ul>

Fuente. Los autores



## 4 Presupuesto

Se realiza el presupuesto ingresando las cantidades y valores de los materiales, las herramientas o elementos y mano de obra que se va a utilizar para realizar la construcción del horno eléctrico con atmosfera controlada.

Es importante aclarar que la cotización se realiza con los precios actuales del mercado nacional, pero esto puede generar una variación con respecto al constante cambio que presenta el precio del dólar, ya que hay materiales que no son fabricados en Colombia, pero si son importados. Se resalta la importancia del presupuesto ya que sirve de guía durante la ejecución o construcción del Horno eléctrico con atmosfera controlada.

El costo total del horno es \$ 7.865.650 pesos, donde el mayor costo se lo lleva la adquisición de herramientas y mano de obra haciendo elevar su costo en comparación con un horno convencional. Teniendo las herramientas y fabricando los hornos en mayor cantidad baja el costo comercial siendo competitivos en el mercado.

Tabla 8. Presupuesto del diseño realizado.

CONCEPTOS	DESIGNACION	CANTIDAD n	PRECIO	IMPORTE	TOTAL		
			UNITARIO p	Parcial n x p			
M A T E R I A L E S	Lámina de acero inoxidable calibre 18	1	C\$100.000,00	C\$100.000,00			
	Tabla Ceramica	1	C\$75.000,00	C\$75.000,00			
	Papel Cerámico	2	C\$55.000,00	C\$110.000,00			
	Resistencias Electricas	3	C\$30.000,00	C\$90.000,00			
	Termocuplo tipo K	1	C\$25.000,00	C\$25.000,00			
	Pintura Electroestática	1	C\$150.000,00	C\$150.000,00			
	Tornillos de 1/8*1/2"	50	C\$300,00	C\$15.000,00			
	Soldadura inoxidable 308 en 3/32"	1	C\$64.000,00	C\$64.000,00			
	Remaches Pop de 1/8"	36	C\$200,00	C\$7.200,00			
	Discos de Corte	3	C\$7.000,00	C\$21.000,00			
	Discos de Mopa	1	C\$15.000,00	C\$15.000,00			
	Thinner	1	C\$15.000,00	C\$15.000,00			
	PLC (controlador modular SIMATIC S7-1200)	1	C\$1.200.000,00	C\$1.200.000,00			
	Rele Térmico	1	C\$120.000,00	C\$120.000,00			
	Automatización del Horno	1	C\$100.000,00	C\$100.000,00			
		0	C\$0,00	C\$0,00		<b>SUBTOTAL</b>	
		0	C\$0,00	C\$0,00		<b>C\$2.107.200,00</b>	
	E F E C T O S	Equipo de Soldadura lincoln	1	C\$1.750.000,00		C\$1.750.000,00	
		Dobladora	30	C\$800,00		C\$24.000,00	
Roladora		1	C\$10.000,00	C\$10.000,00			
Torno y Fresadora		1	C\$60.000,00	C\$60.000,00			
Pulidora dewalt		1	C\$650.000,00	C\$650.000,00			
Taladro dewalt		1	C\$550.000,00	C\$550.000,00			
		0	C\$0,00	C\$0,00	<b>SUBTOTAL</b>		
		0	C\$0,00	C\$0,00	<b>C\$3.044.000,00</b>		
M A D B N E R O A	Técnico en pintura	1	C\$180.000,00	C\$180.000,00			
	Diseñador	1	C\$600.000,00	C\$600.000,00			
	Técnico Electromecánico	1	C\$800.000,00	C\$800.000,00			
	Ayudante	1	C\$750.000,00	C\$750.000,00			
		0	C\$0,00	C\$0,00		<b>SUBTOTAL</b>	
	0	C\$0,00	C\$0,00	<b>C\$2.330.000,00</b>			
GASTOS GERALES	DIRECTOS	10% DE M.O	C\$233.000,00		<b>SUBTOTAL</b>		
	INDIRECTOS	5% DE M.O	C\$116.500,00		<b>C\$349.500,00</b>		
GASTOS VARIOS	Amortizaciói	3% DE G.G	C\$10.485,00		<b>SUBTOTAL</b>		
	imprevistos	7% DE G.G	C\$24.465,00		<b>C\$34.950,00</b>		

PRECIO DE COSTO

C\$7.865.650,00

Fuente. Los autores.

## Conclusiones

Aplicando los conceptos de transferencia de calor, se logró realizar el diseño de un horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmosfera controlada con una temperatura máxima de operación por encima de 1200°C.

De acuerdo con la investigación realizada de los hornos con atmosfera controlada no se encontró documentación en donde se especifique la fabricación o construcción para esta clase de hornos. La poca información obtenida sobre esta clase de hornos con atmosfera controlada fue por medio de revistas de empresas metalmecánicas extranjeras. Por lo que fue necesario, partir desde la teoría de transferencia de calor, electricidad y otros espacios académicos para lograr un diseño pertinente según la necesidad identificada por esta tesis.

En relación con la protección de la pieza utilizando un gas para su protección superficial se determina que el gas apropiado para el tratamiento térmico es el argón, ya que sus propiedades no permiten la delaminación, descarburación, no genera oxidación de la pieza y su manipulación es bastante segura para la persona que opere el horno diseñado.

El horno para tratamientos térmicos con atmósfera controlada calentado por resistencias eléctricas operaría con una potencia de 7 kW, con una eficiencia de los 59% a una temperatura máxima de 1370°C de funcionamiento basados en las propiedades de los materiales utilizados en el cálculo. La estructura metálica que soporta el horno es confiable de acuerdo con los cálculos realizados.

Los cálculos realizados permiten establecer que los materiales a usar son los adecuados para la estructura metálica, con un factor de seguridad muy encima de lo necesario.

Por último, se concluye que la totalidad de los materiales a utilizar para la fabricación del horno son fáciles de adquirir, donde su valor comercial no es alto, en contraste con la mano de obra para su diseño, equipos y fabricación, que es bastante costosa llevando como consecuencia que el costo final del horno se eleve.

## **5 Recomendaciones**

- Profundizar en estudios del sistema de control del horno térmico para tratamientos térmicos con atmosfera controlada teniendo en cuenta los valores del mercado de los elementos a utilizar.
- Realizar la construcción del horno eléctrico con atmosfera controlada diseñando su manual de uso y mantenimiento.

## 6 Bibliografía

- [1] B. M. Pillajo Corella y F. I. Romero Velasco, «Diseño y Construcción de un horno calentador por resistencias eléctricas.,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [2] Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, «Tratamientos Térmicos,» Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2008.
- [3] F. Botero, «Maquinaria hornos de inducción: producción limpio y eficiente,» *Metal actual*, p. 27, 2011.
- [4] M. C. R. Cruz, «Gases en Metalurgia: Poderosos Trabajores Invisibles,» *METALACTUAL*, pp. 36-41, 2016.
- [5] F. E. Castillejo Nieto y J. J. Olaya Flórez, «RECUBRIMIENTOS DE VC Y NBC PRODUCIDOS POR DRT: TECNOLOGÍA ECONÓMICA, EFICIENTE Y AMBIENTALMENTE LIMPIA,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2012.
- [6] F. Franco y J. H. Paz, «Tratamiento Térmico de Aceros de Bajo Carbono en Horno de Atmósfera Controlada,» *Ingeniería y Competitividad* , pp. 56 - 64, 2004.
- [7] J. A. Lasek, «Investigations of the reduction of NO to N2 by reaction with,» *Heat Mass Transfer*, pp. 933-943, 2014.
- [8] L. J. Rodriguez Velez, A. Ortiz Cardenas, C. A. López y J. Moy, «IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS CON ATMÓSFERA GASEOSA CONTROLADA EN FORJAS BOLÍVAR S.A.,» Medellín, 2010.
- [9] J. A. Barreiro, *Tratamientos Térmicos de los Aceros*, Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat, 2000.
- [10] A. V. Giraldo, *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*, Medellín: Universidad de Antioquia, 2009.
- [11] J. F. Obando B., A. Castro P. y C. A. Trujillo, «Diseño y construcción de un prototipo controlado para carburización gaseosa de aceros utilizando alcoholes,» *SciELO*, vol. 26, nº 1, pp. 86-91, 2006.
- [12] R. RUIZ, *Tratamientos Térmicos*, Quito: EPN, 2007.

- [13] Universidad Tecnológica de Pereira, Metalografía, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
- [14] Escuela Colombiana de Ingeniería, Tratamientos Térmicos Protocolo, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008-2.
- [15] P. M. Solá, Tratamiento térmico de los metales, Barcelona : MARCOMBO S.A., 1991.
- [16] T. R. Kuphaldt, Lessons In Industrial Instrumentation, San Francisco, California: Creative Commons Attribution 4.0 International Public License, 2008-2017.
- [17] c. r. cortes, «CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES,» Universidad de Chile, facultad de ciencias forestales, departamento de tecnología de la madera, Santiago de Chile, 2001.
- [18] NATIONAL INSTRUMENTS, «Fundamentos de medidas de sensores,» 23 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4045/es/>. [Último acceso: 16 Febrero 2018].
- [19] Schneider Electric, «Manual electrotécnico, Telesquemario, Telemecanique,» España, 1999.
- [20] I. J. F. Obando, «Subcero y Criogénico,» *Metal Actual*, p. 52, 2012.
- [21] D. M. J. R. I. CAÑADAS, «Tratamiento térmico de materiales en el Horno Solar de la PSA: Líneas Actuales de Actividad,» *BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO*, pp. 591 - 595, 2004.
- [22] Nitrox, «Grupo Nitrox,» Febrero 2007. [En línea]. Available: <http://gruponitrox.com.ve/seguridad/files/Argon.pdf>. [Último acceso: 16 Febrero 2018].
- [23] M. Rose, «Photonics Spectra,» Octubre 2008. [En línea]. Available: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=35225&PID=5&VID=22&IID=158>. [Último acceso: 18 Octubre 2016].
- [24] S. M. Gonzales, «diseño de un ciclo de cementado y tratamiento térmico de arcos de candado en acero SAE 1022,» Universidad Nacional Mayor De San Marcos, Lima - Peru, 2006.
- [25] Nabertherm, «Tecnología para Procesos Térmicos,» 28 Noviembre 2017. [En línea]. Available: [www.nabertherm.es](http://www.nabertherm.es). [Último acceso: 28 Noviembre 2017].

- [26] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, Transferencia de calor y masa, México: McGraw-Hill, 2011.
- [27] F. P. INCROPERA, Fundamentos de Transfencia de Calor, México: Cengage Learning., 1999.
- [28] erecos, «catálogo de productos,» erecos, Bogotá, 2005.
- [29] Sika Colombia, «Mortero refractario: con alta resistencia térmica,» 02 07 2010. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Mortero-refractario-Sika-Rep-115-61433.html>. [Último acceso: 18 Octubre 2016].
- [30] J. Astigarraga Urquiza, Hornos Industriales de resistencias, España: McGraw-Hill, 1994.
- [31] F. NORTON, Refractories, NEw York: McGraw - Hill, 1949.
- [32] F. Kreith, Principios de Transferencia de Calor, México: Continental S.A., 2011.
- [33] Kanthal, Kanthal Handbook, Suiza: Primatryck, 2003.
- [34] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Mexico: Mc Graw-Hill, 2008.
- [35] siemens, «siemens españa,» 1996 - 2018. [En línea]. Available: [http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores\\_modulares/controlador\\_basico\\_s71200/pages/s7-1200.aspx?ismobile=true](http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores_modulares/controlador_basico_s71200/pages/s7-1200.aspx?ismobile=true). [Último acceso: 28 enero 2018].
- [36] J. L. García, J. Martin, T. Gómez y E. Águeda, Elementos amovibles y fijos no estructurales, Madrid: THOMSON PARANINFO, 2005.
- [37] CHROMALOX Advanced Thermal Technologies, «CHROMALOX Advanced Thermal Technologies,» [En línea]. Available: <http://www.chromalox.com>. [Último acceso: 17 11 2017].
- [38] J. J. M. Orrego, Electricidad I. Teoría básica y prácticas, Barcelona (España): Marcombo, ediciones técnicas, 2008.
- [39] M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice-Hall Hispanoamerica, S.A., 1997.
- [40] J. M. Güeto, Tecnología de los Materiales Cerámicos, Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2005.

- [41] B. Hernandez Briones, «SISTEMAS ELÉCTRICOS,» TÉCNICO SUPERIOR UNIVERSITARIO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, Xicotepec de Juarez Puebla, 2015.



# Anexos

## Anexo 1

### Cálculos de potencia en circuitos trifásicos [37].

Chromalox Technical Documents

## Información Técnica

### Información técnica

#### Fundamentos eléctricos y cálculos trifásicos

##### La Ley de Ohm

La relación entre la emisión de voltaje (calor) y el voltaje aplicado de los elementos de calentamiento de resistencia eléctrica se determina por una regla física precisa definida como la Ley de Ohm, la cual establece que la corriente en un elemento de calentamiento resistivo es directamente proporcional al voltaje aplicado. La Ley de Ohm se expresa tradicionalmente como:

$$I = \frac{E}{R}$$

Donde: I = Amperes (Corriente)  
E = Voltaje  
R = Ohms (Resistencia)

La misma ecuación usando la abreviación convencional para el voltaje es:

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde: I = Amperes (Corriente)  
V = Voltaje  
R = Ohms (Resistencia)

Un valor eléctrico desconocido puede calcularse usando los otros dos valores conocidos en una de las variaciones de la ley de Ohm mostrada a la derecha.

##### Relaciones de voltaje y wattaje

Un elemento de resistencia eléctrica sólo produce un valor de wattaje dado a un valor de voltaje dado. Esto es común para elementos de calentamiento eléctrico y conjuntos que van a ser conectados en un amplio rango de voltajes de operación. Dado que la salida de wattaje varía directamente con la rata del cuadrado del voltaje, el voltaje actual puede ser calculado para cualquier voltaje aplicado. La relación es expresada por la ecuación presentada abajo,

$$W_A = W_N \left( \frac{V_A}{V_N} \right)^2$$

Donde:  $W_A$  = Wattaje existente  
 $W_N$  = Wattaje nominal  
 $V_A$  = Voltaje aplicado  
 $V_N$  = Voltaje nominal

##### Ecuaciones trifásicas (balanceadas)

La ley de Ohm como se estableció arriba, se aplica a los elementos de resistencia eléctrica operados en circuitos monofásicos. La ley de Ohm puede ser modificada para calcular valores trifásicos adicionando un factor de corrección para las relaciones del voltaje de fase. Las ecuaciones trifásicas pueden aplicarse a cualquier circuito delta o estrella. Los términos usados en las ecuaciones son identificados abajo:

- $V_L$  = Voltaje de línea
- $V_P$  = Voltaje de fase
- $I_L$  = Corriente de línea (A)
- $I_P$  = Corriente (A)
- $W$  = Wattaje total
- $R_L = R_1 = R_2 = R_3$  = Resistencia del elemento
- $W_C$  = Wattaje por circuito (circuitos iguales)
- $R_C$  = Resistencia del circuito en Ohm medida fase a fase

#### VOLTIOS

$$\text{VOLTIOS} = \sqrt{\text{WATIOS} \times \text{OHMS}}$$

$$\text{VOLTIOS} = \frac{\text{WATIOS}}{\text{AMPERIOS}}$$

$$\text{VOLTIOS} = \text{AMPERIOS} \times \text{OHMS}$$

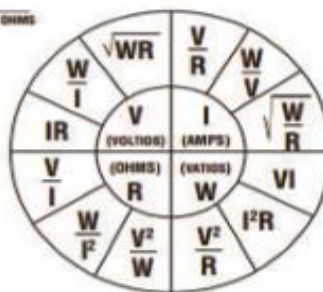
#### OHMS

$$\text{OHMS} = \frac{\text{VOLTIOS}}{\text{AMPERIOS}}$$

$$\text{OHMS} = \frac{\text{WATIOS}}{\text{AMPERIOS}^2}$$

$$\text{OHMS} = \frac{\text{VOLTIOS}^2}{\text{WATIOS}}$$

#### LEY DE OHM



#### AMPERIOS

$$\text{AMPERIOS} = \frac{\text{VOLTIOS}}{\text{OHMS}}$$

$$\text{AMPERIOS} = \frac{\text{WATIOS}}{\text{VOLTIOS}}$$

$$\text{AMPERIOS} = \sqrt{\frac{\text{WATIOS}}{\text{OHMS}}}$$

#### WATIOS

$$\text{WATIOS} = \text{VOLTIOS} \times \text{AMPERIOS}$$

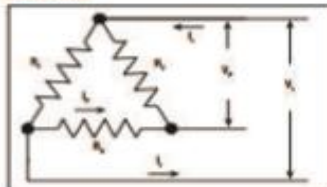
$$\text{WATIOS} = \text{AMPERIOS}^2 \times \text{OHMS}$$

$$\text{WATIOS} = \frac{\text{VOLTIOS}^2}{\text{OHMS}}$$

##### Porcentaje de wattaje nominal para varios voltajes aplicados

Voltaje aplicado	Voltaje nominal														
	118	115	120	208	220	230	240	277	300	415	440	460	480	575	
110	100	91	84	28	25	23	21	16	8.4	7.6	6.2	5.7	5.2	3.7	
115	109	100	92	31	27	25	23	17	9.0	7.6	6.7	6.2	5.7	4.0	
120	119	109	100	33	30	27	25	19	10	8.4	7.4	6.8	6.3	4.3	
208	---	---	300	100	89	82	75	56	30	25	22	20	19	13	
220	---	---	---	112	100	91	84	63	34	28	25	23	21	15	
230	---	---	---	122	109	100	92	69	37	31	27	25	23	16	
240	---	---	---	133	119	109	100	75	40	33	30	27	25	17	
277	---	---	---	---	---	---	133	100	53	45	40	36	33	23	
300	---	---	---	---	---	---	---	188	100	84	74	68	63	44	
415	---	---	---	---	---	---	---	---	119	100	89	81	75	52	
440	---	---	---	---	---	---	---	---	---	112	100	91	84	58	
460	---	---	---	---	---	---	---	---	---	123	109	100	92	64	
480	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	119	109	100	70	
550	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	156	143	131	91	
575	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	171	156	144	100	
600	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	186	170	156	109	

##### 3Ø Delta



$$V_P = V_L$$

$$W_T = 1.73 I_L \times V_L$$

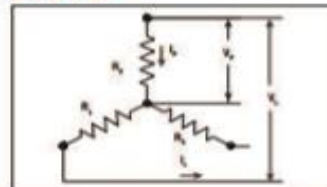
$$I_P = I_L \times 1.73$$

$$W_C = 1.73 I_L \times V_L \div \# \text{ circuitos}$$

$$R_C = (2 \times V_L^2) \div W_C$$

**Nota:** Para conexiones abiertas tipo delta, vea la próxima página.

##### 3Ø Estrella



$$V_P = V_L \div 1.73$$

$$W_T = 1.73 I_L \times V_L$$

$$I_P = I_L$$

$$W_C = 1.73 I_L \times V_L \div \# \text{ circuitos}$$

$$R_C = (2 \times V_L^2) \div W_C$$

**Nota:** Para conexiones en estrella abiertas, vea la próxima página.

## Anexo 2

### Carga de la resistencia máxima recomendada Kanthal 1 [33]

# Element surface load

Since KANTHAL alloys can be operated at higher temperatures than NIKROTHAL alloys, a higher surface loading can be achieved without jeopardizing the life. Element design is also of great importance. The more freely radiating the element form, the higher the maximum surface load. Therefore the R.O.B. (Rod Over Bend) type element (corrugated heavy wire, mounted on the surface), can be loaded the highest, followed by the corrugated strip element.

Spiral elements on ceramic tubes can be loaded higher than spiral elements in grooves.

The values in Fig. 4 are given for the following design conditions:

#### Element a

Wire and strip element in grooves. Wire diameter min. 3 mm, 0.12 in, strip thickness min. 2 mm, 0.08 in.

#### Element b

Wire element on ceramic tube  
Wire diameter min. 3 mm 0.12 in.

#### Element types c (strip) and d (heavy wire)

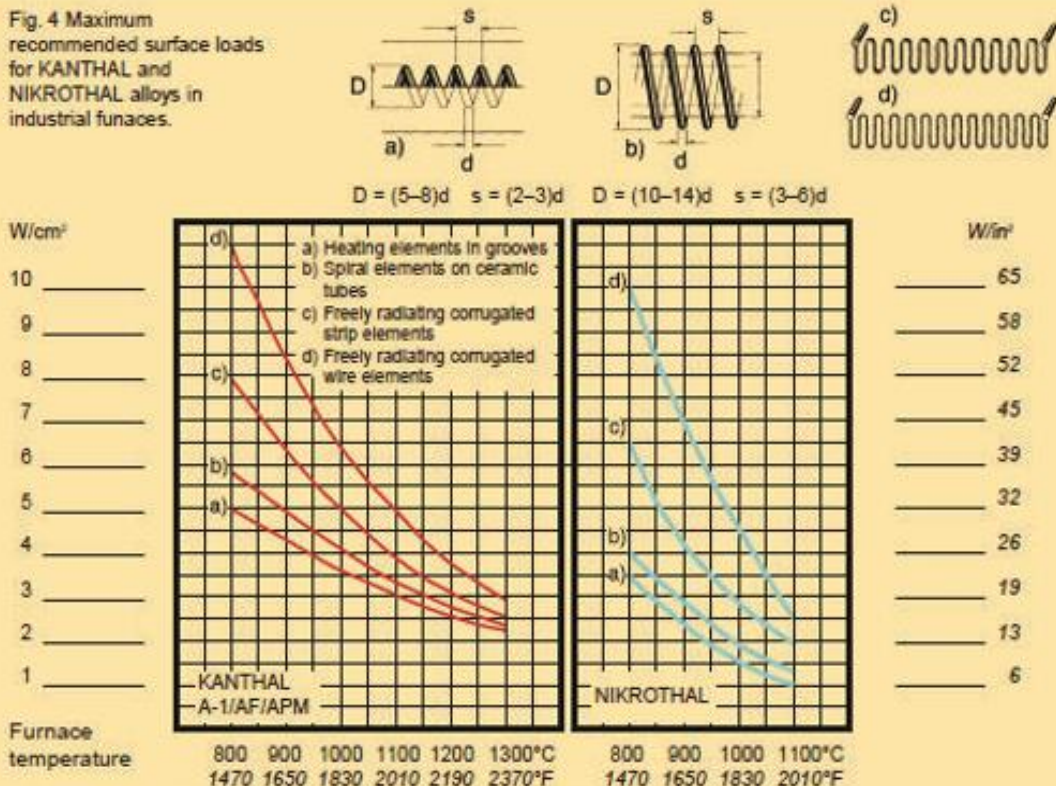
Strip thickness min. 2.5 mm, 0.1 in. Wire diameter min. 5 mm, 0.2 in. Pitch min. 50 mm, 2.0 in at maximum loop length and maximum surface load.

Maximum recommended loop length:

<900°C	<1650°F	300 mm	11.8 in
1000°C	1820°F	250 mm	9.8 in
1100°C	2010°F	200 mm	7.9 in
1200°C	2190°F	150 mm	5.9 in
1300°C	2370°F	100 mm	3.9 in

For finer wire diameters and smaller strip thicknesses lower surface loads and shorter loop lengths must be chosen to avoid element deformation and subsequent shorter element life.

Fig. 4 Maximum recommended surface loads for KANTHAL and NIKROTHAL alloys in industrial furnaces.



Note: The diagram is valid for thyristor control. For on-off control lower surface loads should be chosen. (About 20%).

## Anexo 3

Propiedades de las aleaciones de Kanthal [33].

# Physical and Mechanical Properties

KANTHAL and NIKROTHAL alloys are generally available in wire or strip form. Physical and mechanical properties of the alloys are listed in Table 2.

Table 2. KANTHAL and NIKROTHAL, Wire and Strip.

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80	NIKROTHAL 70	NIKROTHAL 60	NIKROTHAL 40
Max continuous operating temp., °C	1425	1400	1300	1300	1200	1250	1150	1100
°F	2600	2550	2370	2370	2190	2280	2100	2010
Nominal composition, % Cr	22	22	22	22	20	30	15	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	80	70	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cm <sup>2</sup>	872	872	836	812	655	704	668	626
Density, g/cm <sup>3</sup>	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.1	8.2	7.9
lb/in <sup>3</sup>	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300	0.296	0.296	0.285
Coefficient of thermal expansion, K <sup>-1</sup>								
20-750°C, 68-1380°F	14.10 <sup>-4</sup>	14.10 <sup>-4</sup>	14.10 <sup>-4</sup>	14.10 <sup>-4</sup>	17.10 <sup>-4</sup>	16.10 <sup>-4</sup>	16.10 <sup>-4</sup>	18.10 <sup>-4</sup>
20-1000°C, 68-1838°F	15.10 <sup>-4</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	18.10 <sup>-4</sup>	17.10 <sup>-4</sup>	17.10 <sup>-4</sup>	19.10 <sup>-4</sup>
Thermal conductivity at 20°C								
W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	13	13	13	13	15	13	13	13
68°F, Btu in ft <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup>	90	90	90	90	104	90	90	90
Specific heat capacity								
KJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , 20°C	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50
Btu lb <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> , 68°F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.119
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390
°F	2730	2730	2730	2730	2550	2515	2535	2535
Mechanical properties (approx.)*								
Tensile strength, N mm <sup>-2</sup>	680	680	680	680	750	875	750	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000	127000	109000	109000
Yield point, N mm <sup>-2</sup>	445	445	445	445	450	450	450	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness, Hv	230	230	230	230	180	185	180	180
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30	30	30	30
Tensile strength at 900°C, Nmm <sup>-2</sup>	40	34	37	34	100	120	100	120
1650°F, psi	5800	5000	5400	5000	14500	17400	14500	17400
Creep strength at 800°C, N mm <sup>-2</sup>	14	6	8	6	15	15	15	20
1000°C, N mm <sup>-2</sup>	1.8	1	1.5	1	4	4	4	4
1470°F, psi	2000	870	1160	870	2160	2160	2160	2160
1830°F, psi	260	145	215	145	580	580	580	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600°C 1100°F)				Non		Slightly Non	
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.88

\* The values given apply for sizes of 4 mm, 0.16 in diameter for the KANTHAL alloys and of 1 mm, 0.04 in for the NIKROTHAL alloys.

## Anexo 4

### Cargas de las paredes del horno [33].

# Furnace wall loading

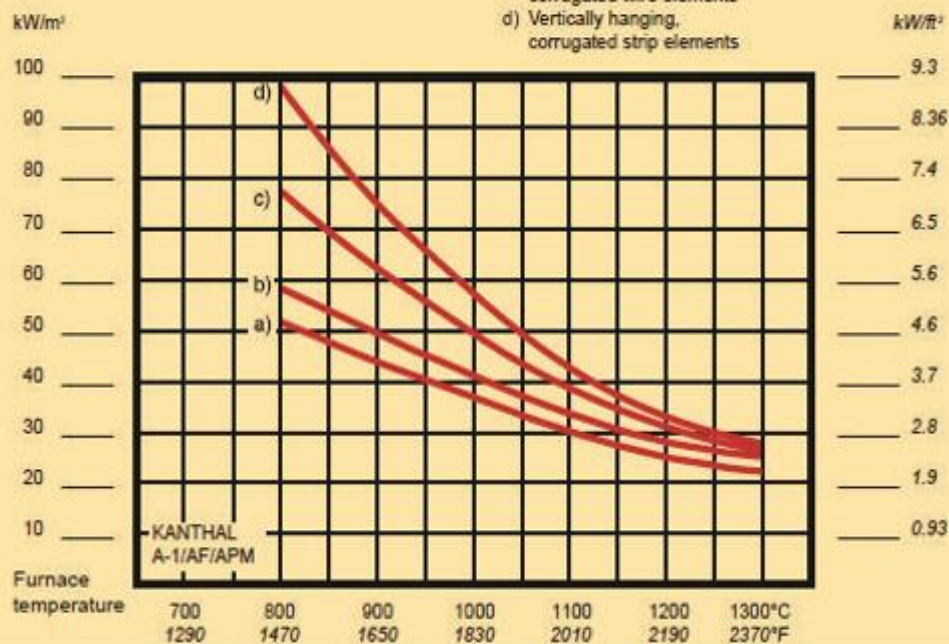
Figure 3 shows the maximum recommended wall loading for four different element types. Please note that the furnace wall loading depends on both element type and element surface load. The lower the surface load, the longer the element life will be. (For description of the element types, see page 7).

When elements are placed on the base of a furnace, special attention must be paid to avoid overheating of the elements. For example, with a hearth plate having a thermal conductivity of  $(\lambda)=1.0 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$   $6.39 \text{ Btu in ft}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{F}^{-1}$  and thickness of 15 mm, 0,63 in, at a power concentration on the bottom surface of  $15 \text{ kW/m}^2$ ,  $1.4 \text{ kW/ft}^2$ , a temperature drop of  $225^{\circ}\text{C}$ ,  $435^{\circ}\text{F}$  is obtained through the plate. The total temperature difference between the

base elements and the furnace temperature would thus be about  $375^{\circ}\text{C}$ ,  $700^{\circ}\text{F}$ . This imposes a furnace operating temperature of  $1000^{\circ}\text{C}$ ,  $1830^{\circ}\text{F}$  even when using the high-temperature KANTHAL A-1 alloy, since the element temperature will be about  $1375^{\circ}\text{C}$ ,  $2500^{\circ}\text{F}$ .

The example illustrates the significance of choosing a hearth plate of a material having good thermal conductivity, for example silicon carbide or heat-resistant steel. Besides measuring the temperature in the furnace chamber, it may also be advisable to measure the temperature of the base elements by means of a separate thermocouple.

Fig. 3 Maximum recommended wall loading as a function of furnace temperature for different element types.



## Anexo 5

Coeficiente de temperatura para el Kanthal A-1 [33].

# KANTHAL A-1 and APM

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity  $1.45 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ . Density  $7.1 \text{ g cm}^{-3}$ . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor  $C_t$  in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
$C_t$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega$ $20^\circ\text{C}$	Strip*) WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega$ $20^\circ\text{C}$
1.0	1.85	5.58	17.0	5.0x1.0	0.290	35.5	414
1.1*)	1.53	6.75	22.7	10.0x1.0	0.145	49.7	1520
1.2	1.28	8.03	29.4	15.0x1.0	0.0967	107	3310
1.3*)	1.09	9.43	37.4	20.0x1.0	0.725	142	5790
1.4*)	0.942	10.9	46.7	12.0x1.2	0.101	102	2620
1.5	0.821	12.5	57.4	15.0x1.2	0.101	128	4020
1.6*)	0.721	14.3	69.7	10.0x1.5	0.097	107	2380
1.7	0.639	16.1	83.6	12.0x1.5	0.0806	128	3350
1.8	0.570	18.1	99.2	15.0x1.5	0.0644	160	5120
2.0	0.462	22.3	136	20.0x1.5	0.0483	213	8900
2.2	0.381	27.0	181	25.0x1.5	0.0387	266	13700
2.3	0.349	29.5	207	30.0x1.5	0.0320	320	19800
2.4*)	0.321	32.1	235	15.0x2.0	0.0483	213	7040
2.5	0.295	34.9	266	20.0x2.0	0.0363	284	12100
2.6	0.273	37.7	299	25.0x2.0	0.0290	355	18600
2.8	0.235	43.7	374	30.0x2.0	0.0242	426	26500
2.9	0.219	47.0	416	20.0x2.5	0.0290	355	15500
3.0	0.205	50.2	460	25.0x2.5	0.0232	444	23700
3.25	0.175	58.9	584	30.0x2.5	0.0193	533	33600
3.5	0.151	68.3	730	20.0x3.0	0.0242	426	19008
3.75	0.131	78.4	897	25.0x3.0	0.0193	533	26200
4.0	0.115	89.2	1090	30.0x3.0	0.0161	639	41000
4.25	0.102	101	1306				
4.5	0.0912	113	1550				
4.75	0.0818	126	1824				
5.0	0.0738	139	2127				
5.5	0.0610	169	2831				
6.0	0.0513	201	3676				
6.5	0.0437	236	4673				
7.0	0.0377	273	5840				
7.35	0.0340	300	5840				
8.0	0.0288	357	8690				
8.25	0.0271	380	9560				
9.5	0.0205	503	14600				
10.0	0.0185	558	17000				

\*) only A-1

## Anexo 6

Relaciones para determinar el diámetro de alambre para resistencia eléctrica [33].

### Formulas and definitions

The following formulas and definitions are applied to all applications.

**Definition:** Resistivity,  $\rho$   $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  ( $\Omega/\text{cmf}$ )

The resistance of a conductor,  $R_{20}$ , is directly proportional to its length, L and inversely proportional to its cross-sectional area, q:

$$R_{20} = \rho \frac{L}{q} \quad \Omega \quad [1]$$

The proportional constant,  $\rho$  is defined as the resistivity of the material and is temperature dependent. The unit of  $\rho$  is  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  ( $\Omega/\text{cmf}$ ).

**Definition:** Temperature factor,  $C_t$

Resistivity or change in resistance with temperature, is non-linear for most resistance heating alloys. Hence, the temperature factor,  $C_t$ , is often used instead of temperature coefficient.  $C_t$  is defined as the ratio between the resistivity or resistance at some selected temperature T °C and the resistivity or resistance at 20°C (68°F).

$$R_T = C_t \cdot R_{20} \quad \Omega \quad [2]$$

$$C_t = \frac{R_T}{R_{20}} \quad [3]$$

$$C_t = 1 + (T - 20)\alpha \quad (\text{where } T \text{ is in } ^\circ\text{C}) \quad [4]$$

**Definition:** Surface load, p  $\text{W}/\text{cm}^2$  ( $\text{W}/\text{in}^2$ )

The surface load of a heating conductor, p, is its power, P, divided by its surface area,  $A_c$ .

$$p = \frac{P}{A_c} \quad \text{W}/\text{cm}^2 \quad (\text{W}/\text{in}^2) \quad [5]$$

### Wire

$$A_c = \pi \cdot d \cdot L \cdot 10 \quad (\text{metric}) \quad [6]$$

$$A_c = \pi \cdot d \cdot L \cdot 12 \quad (\text{imperial}) \quad [6]$$

### Strip/ribbon

$$A_c = 2 \cdot (b + t) \cdot L \cdot 10 \quad (\text{metric}) \quad [7]$$

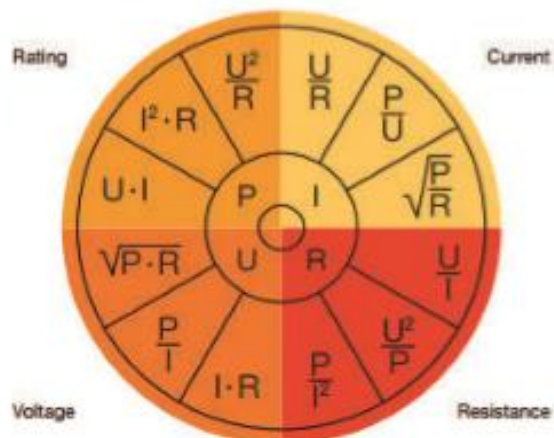
$$A_c = 2 \cdot (b + t) \cdot L \cdot 12 \quad (\text{imperial}) \quad [7]$$

### General formulas

$$U = R_T \cdot I \quad \text{V} \quad [8]$$

$$P = U \cdot I \quad \text{W} \quad [9]$$

Combining equations [8] and [9] gives:



Combining equations [2], [5], [8] and [9] gives:

$$\frac{A_c}{R_{20}} = \frac{P \cdot C_t}{P} \quad \text{cm}^2/\Omega \quad (\text{in}^2/\Omega) \quad [10]$$

The ratio  $\frac{A_c}{R_{20}}$ , used for determining wire, strip or ribbon size, is tabulated for all alloys in the handbook for 'Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces'.

**Definition:** Cross sectional area,  $q$  mm<sup>2</sup> (in<sup>2</sup>)

Round wire

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [11]$$

Combining equations [1], [5], [6] and [11] gives the wire diameter,  $d$ :

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}}} \quad \text{mm (in)} \quad [12]$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}} \cdot \frac{1}{10}} \quad \text{(metric)} \quad [12]$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\rho \cdot P}{p \cdot R_{20}} \cdot \frac{1}{15.28 \cdot 10^6}} \quad \text{(imp.)} \quad [12]$$

**Example:**

$\rho = 1.35 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  (812  $\Omega/\text{cmf}$ ) for Kanthal D  
(according to section 2)

$P = 1000 \text{ W}$

$p = 8 \text{ W/cm}^2$  (51.6  $\text{W/in}^2$ )

$R = 40 \Omega$

According to equation [12]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{1.35 \cdot 1000}{8 \cdot 40} \cdot \frac{1}{10}} = 0.55 \text{ mm}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{812 \cdot 1000}{51.6 \cdot 40} \cdot \frac{1}{15.28 \cdot 10^6}} = 0.022 \text{ in}$$

Strip

$$q = b \cdot t \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [13]$$

Ribbon

Since ribbons are made by flattening round wires, the cross-sectional area is somewhat smaller depending on size, than equation [13] indicates. As a rule of thumb, a factor 0.92 is used.

$$q = 0.92 \cdot b \cdot t \quad \text{mm}^2 \text{ (in}^2\text{)} \quad [14]$$

Lately, investigations have shown that a more correct way of expressing the cross-sectional area of ribbon is:

$$q = \left( 0.985 - \left( \frac{t}{2 \cdot b} \right)^2 \right) \cdot b \cdot t \quad [14^*]$$

(Equation [14] is, however, used throughout this handbook).

**Definition:** Number of turns,  $n$

$$n = \frac{L_s}{s} \quad [15]$$

**Definition:** Coil pitch,  $s$  mm (in)

A round wire is often wound as a coil. For calculating coil pitch,  $s$ , the equation [16] applies:

$$\left( \frac{\pi \cdot (D-d)}{s} \right)^2 + 1 = \left( \frac{L}{L_s} \right)^2 \rightarrow s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left( \frac{L}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{mm} \quad [16]$$

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left( \frac{L \cdot 1000}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{(metric)} \quad [16^*]$$

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d)}{\sqrt{\left( \frac{L \cdot 12}{L_s} \right)^2 - 1}} \quad \text{(imperial)} \quad [16^*]$$

When the pitch,  $s$ , is small relatively to coil diameter,  $D$ , and wire diameter,  $d$ .

Then  $\frac{s}{\pi(D-d)} \ll L$ , so that equation [16] can be simplified to:

$$s = \frac{\pi \cdot (D-d) \cdot L_s}{L} \quad \text{mm (in)} \quad [17]$$

**Definition:** Relative pitch,  $r$

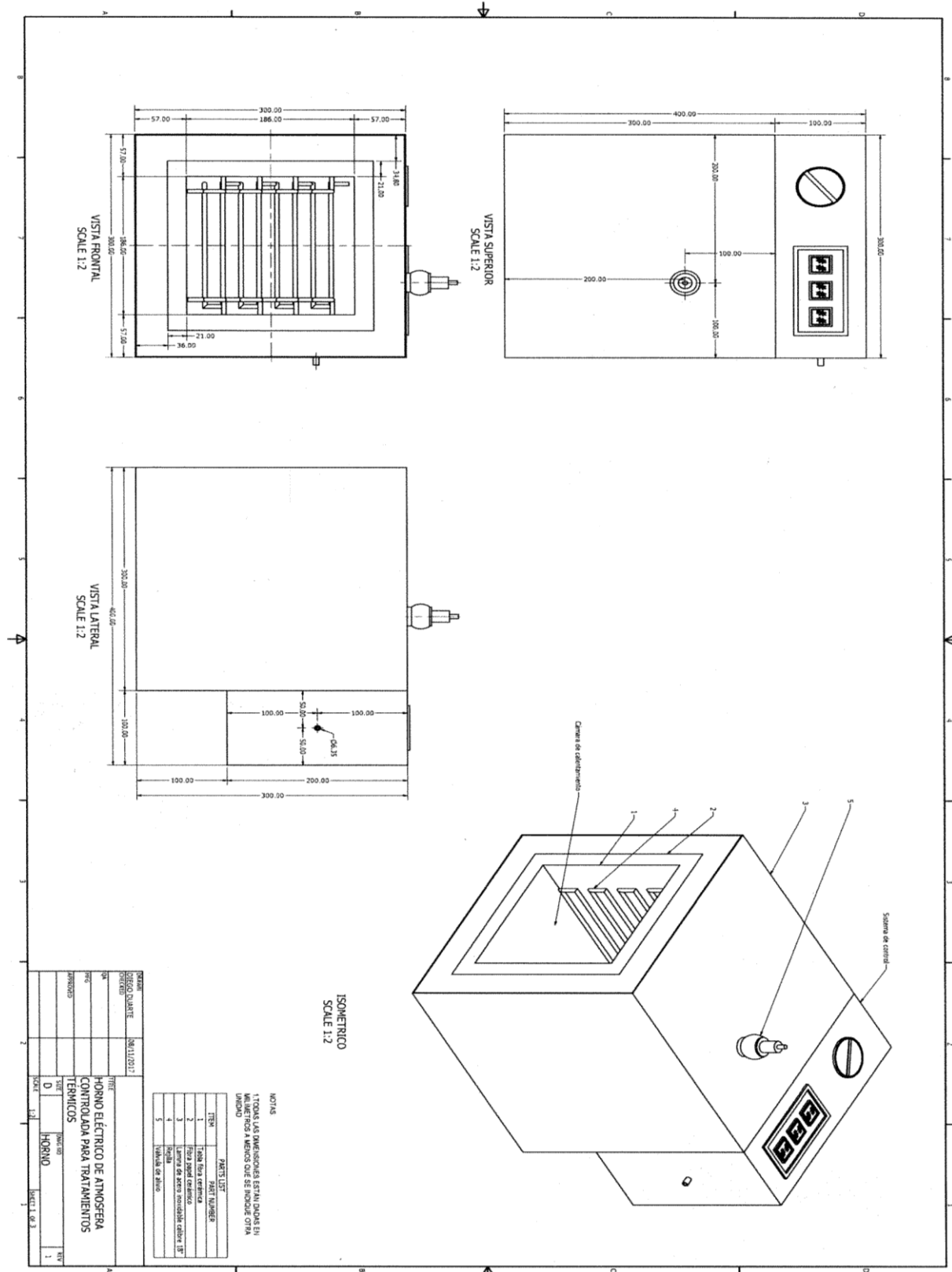
The ratio  $s/d$  is often used. It is called the relative pitch or the stretch factor, and may affect the heat dissipation from the coil.

$$r = \frac{s}{d} \quad [18]$$

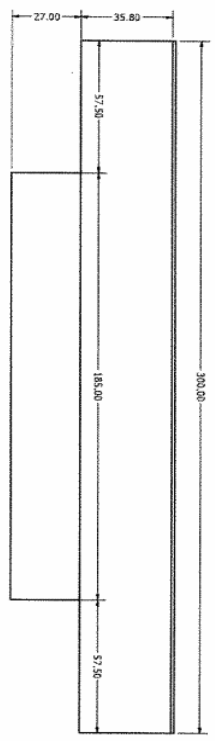
The ratio  $D/d$  is essential for the coiling operation, as well as the mechanical stability of the coil in a hot state.

# Anexo 7

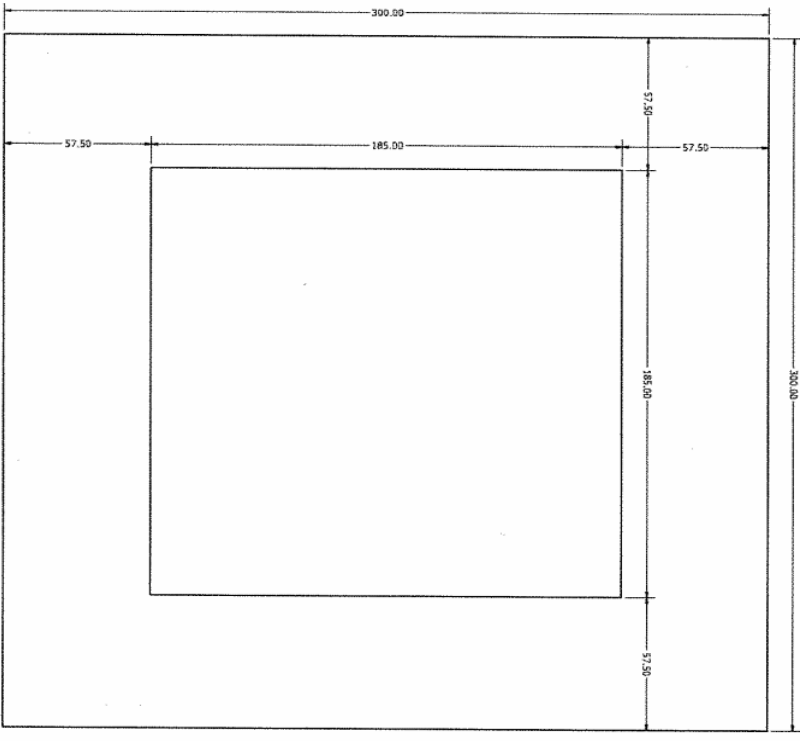
## Planos del Horno Eléctrico con atmosfera controlada



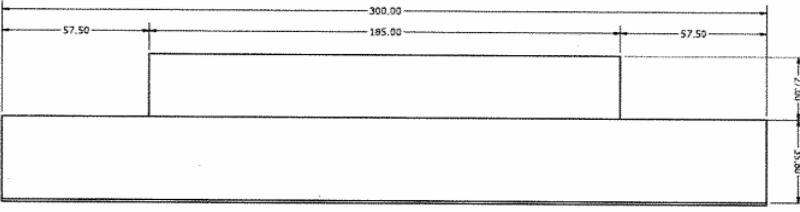




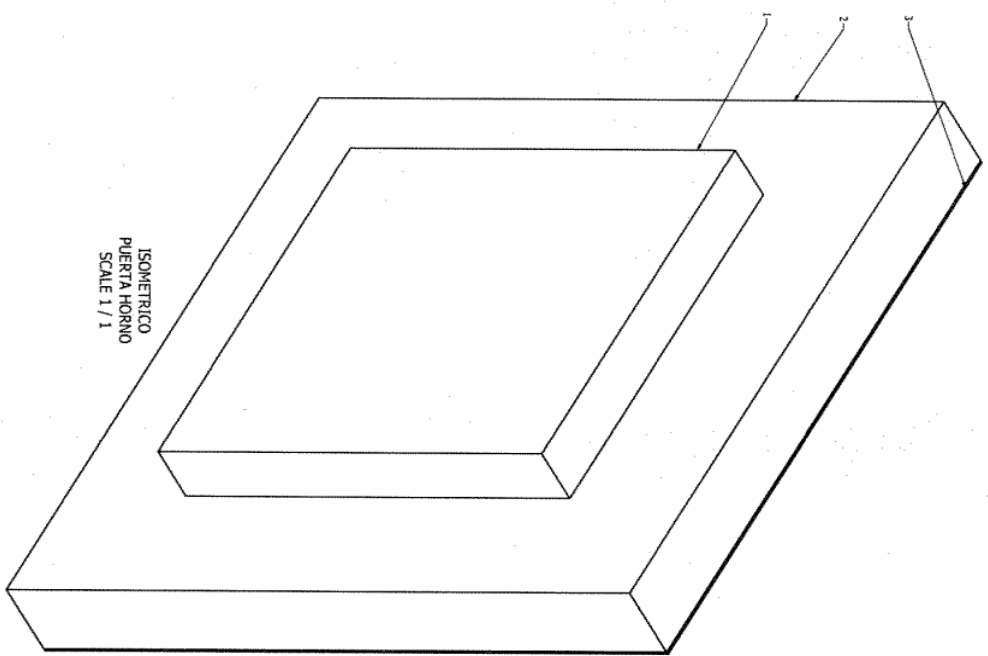
VISTA SUPERIOR  
PUERTA HORNO  
SCALE 1 / 1



VISTA FRONTAL  
PUERTA HORNO  
SCALE 1 / 1



VISTA LATERAL  
PUERTA HORNO  
SCALE 1 / 1

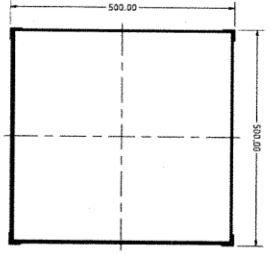


ISOMETRICO  
PUERTA HORNO  
SCALE 1 / 1

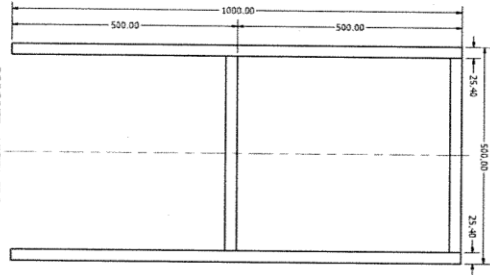
ITEM	PART NUMBER
1	Tapa fibra ceramica
2	Fibra papel ceramica
3	Lamina de acero inoxidable calibre 18"

PROYECTO	QW/11/2017
DISEÑO	
REVISADO	
APROBADO	
TITULO	HORNO ELECTRICO DE ATMOSFERA CONTROLADA PARA TRATAMIENTOS TERMICOS
ESCALA	1 / 1
HOJA	1
PROYECTO	HORNO

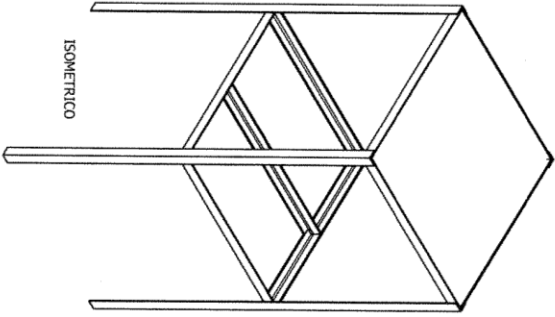
SOPORTE - VISTA SUPERIOR  
SCALE 1 / 5



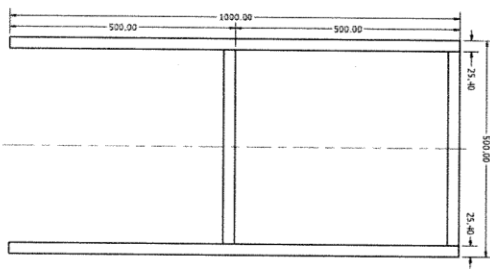
SOPORTE - VISTA FRONTAL  
SCALE 1 / 5



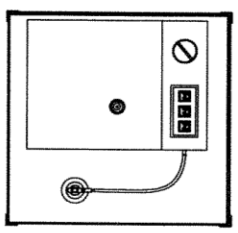
ISOMETRICO



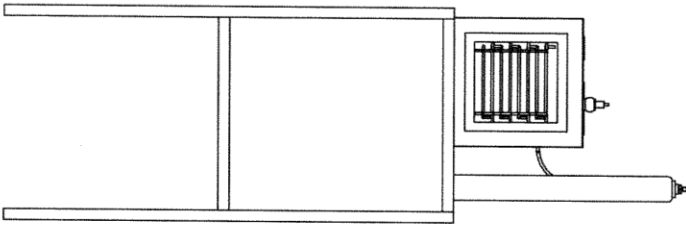
SOPORTE - VISTA LATERAL  
SCALE 1 / 5



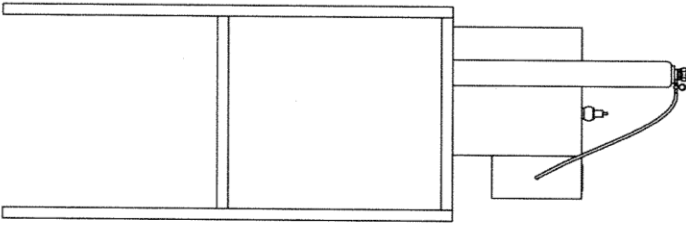
VISTA SUPERIOR  
SCALE 1 / 5



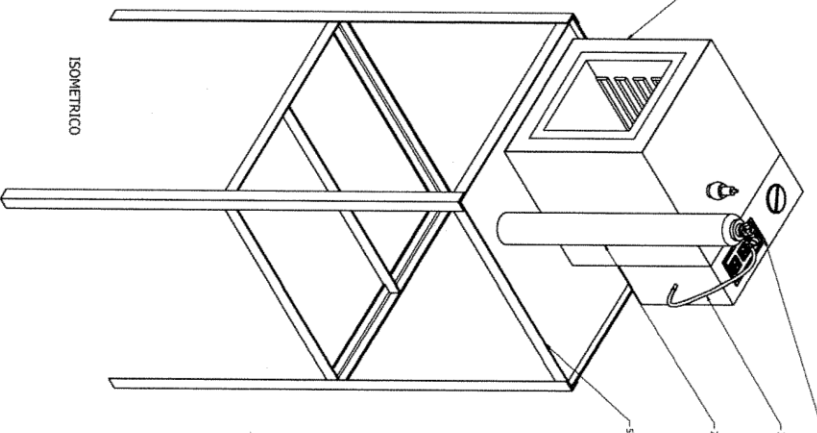
VISTA FRONTAL  
SCALE 1 / 5



VISTA LATERAL  
SCALE 1 / 5



ISOMETRICO



PARTS LIST

ITEM	PART NUMBER
1	CONTROL PANEL
2	POST
3	MANIFOLD
4	SYSTEM OF CONTROL
5	SUPPORT

PROYECTO	30611/2017	TITULO	HORNO ELECTRICO DE ATMOSFERA CONTROLADA PARA TRATAMIENTOS TERMICOS
PROYECTISTA		FECHA	
REVISOR		ESCALA	1/1
APROBADO		PROYECTO	HORNO
FECHA		NO.	1

Hoja 1 de 3