

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Investigaciones de Soldadura

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Dimensionamiento de un horno eléctrico para
tratamiento térmico de aceros

Autor: Arnaldo Nicolas Guesi

Tutores: Dr. Alfonso Rafael Fernández Fuentes

Santa Clara, junio 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Center of Welding Investigations

DIPLOMA THESIS

Title: Sizing of an electric furnace for heat treatment
of steel

Author: Arnaldo Nicolas Guesi

Thesis Director: Dr. Alfonso Rafael Fernández Fuentes

Santa Clara, June 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

DEDICATORIA

A **Dios**, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio e investigación.

A **mi madre, (Priscila Guesi)** a quien tanto quiero, por darme la vida y brindarme comprensión, aliento y cariño. Por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos no hay palabras en este mundo para agradecerte, mamá.

A **toda mi familia** por tenerme la paciencia y su inmenso apoyo en la vida que trace y todos los objetivos que hoy he logrado alcanzar.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, antes de todo agradezco a **Dios** por tener la vida, la salud, por su bendición, gran amor, por darme el preciado don de la vida y por cada paso que doy, dándome sabiduría y fortaleza para seguir luchando contra los obstáculos de la vida y continuar firme para alcanzar mis metas.

A **mi madre (Priscila)** y **toda mi familia** en general que han sabido impulsarme confiadamente desde el primer instante, brindándome comprensión, aliento y cariño, gracias al esfuerzo de ellos, logré la culminación de esta investigación.

A los compañeros de clase, especial a **Luis Alberto Machado** por esos momentos que hicieron de este viaje una gran experiencia de vida.

A la **Universidad Central Marta Abreu de las Villas**, Facultad de Ingeniería Mecánica por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional del más alto nivel.

A todos aquellos que fueron **mis maestros** desde la enseñanza primaria por darme los pasos para enfrentar la vida y educarme para pensar como ingeniero que de soluciones en problemas de la mejora de la vida.

Un especial agradecimiento **a mi tutor (Dr. Alfonso Rafael Fernández Fuentes)**, por el tiempo que se ha dedicado para hacer posible este trabajo de diploma, por darme la confianza, la fortaleza y por creer en mis capacidades.

ÍNDICE

RESUMEN.....	7
SUMMARY	7
INTRODUCCIÓN.....	8
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos	10
1. MARCO TEÓRICO	11
1.1. Generalidades sobre el tratamiento térmico de aleaciones metálicas	11
1.2. Clasificación de los tratamientos térmicos aplicados a los aceros	12
1.3. Tipos de hornos para tratamientos térmicos	14
1.3.1. Clasificación de los hornos según el proceso de calentamiento	15
1.3.2. Clasificación de los hornos según el tipo de solera.....	16
1.4. Partes constituyentes de un horno de tratamiento térmico	18
1.5. Materiales utilizados en la construcción de hornos para tratamiento térmico	19
1.6. Mecanismos de transferencia de calor presentes en los hornos de tratamiento térmico	24
1.6.1. Mecanismo de transferencia de calor por conducción.....	24
1.6.2. Mecanismo de transferencia de calor por convección	25
1.6.3. Mecanismo de transferencia de calor por radiación	27
2. DESARROLLO.....	28
2.1. Recomendaciones sobre el dimensionamiento de un horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico.....	28
2.1.1. El dimensionamiento de la cámara de trabajo de un horno para tratamiento térmico.....	28
2.1.2. El balance de energía térmica en hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico.....	31
2.1.2.1. Generalidades sobre el balance de energía térmica en hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico.....	31
2.1.2.2. Razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga.....	33
2.1.2.3. Razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes del horno	35
2.1.2.4. Razón de transferencia de energía térmica a través de la puerta cuando el horno se carga y se descarga	38
2.1.2.5. Razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior	39

2.1.2.6.	Razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara.....	40
2.1.2.7.	Razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno.....	41
2.1.2.8.	Eficiencia del horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico	43
2.1.2.9.	Potencia nominal del horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico	43
2.1.3.	Dimensionamiento de las resistencias eléctricas metálicas (calentadores) en hornos de tratamiento térmico.....	44
2.1.3.1.	Diámetro (sección circular) o espesor/ancho (sección rectangular) de la resistencia eléctrica y su longitud.....	48
2.2.	Guía del usuario de la herramienta computacional para el dimensionamiento de horno de cámara eléctrico para tratamiento térmico de aceros.....	50
2.2.1.	Descripción del módulo para el cálculo de las dimensiones de la cámara del horno.....	51
2.2.2.	Descripción del módulo para el balance energético del horno.....	52
2.2.3.	Descripción del módulo para el cálculo de las dimensiones de los calentadores eléctricos.....	55
2.3.	Resultados prácticos del dimensionamiento de un horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico.....	59
2.3.1.	Determinación de las dimensiones de la cámara del horno tomado como ejemplo.....	60
2.3.2.	Balance de energía del horno tomado como ejemplo.....	61
2.3.3.	Cálculo de las resistencias eléctricas del horno tomado como ejemplo	63
CONCLUSIONES.....		67
BIBLIOGRAFÍA.....		68

RESUMEN

En el presente trabajo se brinda una recopilación de los principales aspectos que han de tenerse en cuenta para el dimensionamiento de un horno de cámara de resistencia eléctrica para tratamiento térmico de aceros, sobre todo en lo referido al tamaño de la cámara de trabajo, balance energético y dimensiones de los calentadores. Además, se aporta una herramienta computacional que facilita la realización de los cálculos correspondientes al referido dimensionamiento. De esta manera se pretende facilitar la toma de decisión durante la adquisición de hornos de cámara de resistencia eléctrica para tratamiento térmico de aceros, que puedan funcionar en condiciones de producción versátil.

SUMMARY

This work provides a compilation of the main aspects that must be taken into account for the sizing of an electric resistance chamber furnace for the thermal treatment of steels, especially in relation to the size of the working chamber, energy balance and dimensions of the heaters. In addition, a computational tool is provided that facilitates the performance of the calculations corresponding to the aforementioned sizing. In this way, it is intended to facilitate decision-making during the acquisition of electric resistance chamber furnaces for the thermal treatment of steels, which can work under versatile production conditions.

INTRODUCCIÓN

En la industria metal-mecánica se establece un marcado interés por los procesos de manufactura y se destacan aquellos relacionados con la elaboración u obtención directa de un producto con forma determinada; tal es el caso de los procesos de fundición, conformado, maquinado y soldadura. Estos procesos por sí mismos, en la mayoría de los casos, no garantizan las propiedades requeridas del producto elaborado, por lo cual se hace imprescindible la aplicación del tratamiento térmico.

En el caso de los productos elaborados con aceros, con frecuencia, se aplican diferentes tipos de tratamiento térmico, como son, por ejemplo: el recocido, el normalizado, el temple y el revenido; estos tratamientos térmicos se efectúan a temperaturas elevadas, por lo que para su ejecución en la mayoría de los casos se emplean diferentes tipos de hornos para el calentamiento.

Aquellas empresas en las que se realiza o se pretende realizar el tratamiento térmico de aceros, se ven en la necesidad de adquirir, en el mercado nacional o internacional, los correspondientes hornos; para estos casos, los fabricantes producen equipos que satisfacen requerimientos generales o los producen por encargo a la medida de las necesidades del cliente, con garantías en cuanto a eficiencia se trata (Nabertherm, 2018) (Borel, 2018) (SNOL, 2018).

El diseño de los hornos de tratamiento térmico, entre otros aspectos, tiene como base el conocimiento de la temperatura y el tiempo de operación, los cuales dependen del tipo de tratamiento térmico que se ha de realizar y la cantidad y dimensiones de las piezas a ser tratadas. Por este motivo, cuando

una empresa tiene un programa de ejecución de tratamiento térmico de aceros bien establecido (fijo) le resulta obvio adquirir por encargo los equipos necesarios.

Sin embargo, existen no pocas empresas que se ven en la necesidad de adquirir equipos que le permitan su explotación de la manera más versátil posible, ya que su programa de producción es variable y en ocasiones indeterminado, desde el punto de vista del tipo de tratamiento térmico que se ha de realizar y la cantidad y dimensiones de las piezas a ser tratadas. En estos casos apenas se conoce la productividad anual, por lo que la toma de decisiones durante la adquisición de hornos de tratamiento térmico resulta compleja. En este sentido la mayor dificultad radica en definir las características fundamentales del horno requerido, sobre todo su dimensionamiento, en lo referido a tamaño de la cámara interior y potencia.

Para resolver la dificultad planteada anteriormente, se hace necesario comprender la lógica o estrategia empleada en los cálculos que permiten establecer las dimensiones y parámetros fundamentales de operación de los hornos de tratamiento térmico. Se destacan en particular los cálculos referidos a las dimensiones de la cámara de trabajo, al balance de energía y a los calentadores.

La información sobre estos cálculos, aparentemente, está suficientemente recogida en la literatura, sin embargo, una revisión profunda del tema muestra que muchos aspectos quedan dispersos o incluso no se detallan suficientemente. De aquí surge la necesidad de desarrollar un trabajo que se encamine a describir, de manera sencilla y compacta, los fundamentos del

dimensionamiento de hornos de tratamiento térmico de aceros y desarrollar herramientas aplicables en este sentido.

Objetivo General

Confeccionar recomendaciones para realizar los cálculos requeridos en el dimensionamiento (tamaño de la cámara de trabajo, balance energético y calentadores) de un horno de cámara de resistencia eléctrica para tratamiento térmico de aceros, acompañada de una herramienta computacional que facilite la realización de los mismos.

Objetivos Específicos

1. Recopilar información bibliográfica sobre:
 - Tecnología del tratamiento térmico de aceros;
 - Procesos de transferencia de calor en los hornos para tratamiento térmico de aceros;
 - Características constructivas de hornos para tratamiento térmico de aceros.
2. Confeccionar recomendaciones para ejecutar el dimensionamiento desde el punto de vista geométrico, energético y eléctrico de un horno para tratamiento térmico de aceros.
3. Elaborar una herramienta computacional para el dimensionamiento de un horno de resistencia eléctrica para tratamiento térmico de aceros.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades sobre el tratamiento térmico de aleaciones metálicas

Se define el tratamiento térmico de aleaciones metálicas como una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas (Arai et al., 1991). El tratamiento térmico convencional no modifica la composición química de los materiales, pero si les proporciona propiedades específicas para su uso final (Giraldo, 2009).

En la literatura (Ruíz, 2007) se plantea que cualquier proceso de tratamiento térmico puede describirse en un gráfico de coordenadas tiempo-temperatura. A manera de ejemplo en la figura 1 se da el régimen del recocido de homogenización del acero 37CrNi3A (Sokolov, 1988).

Los parámetros principales de todo tratamiento térmico son la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Estos parámetros se establecen de manera que:

- La **temperatura de calentamiento** es la temperatura máxima a la que se calienta el material.
- El **tiempo de permanencia** es el tiempo que se mantiene el material a la temperatura de calentamiento, durante este tiempo se logra la transformación total o parcial de la microestructura de la aleación, se homogeniza la composición química y se uniformiza la temperatura de todo el material.

- La **velocidad de calentamiento** es el aumento de la temperatura del material en un determinado intervalo de tiempo, esta velocidad debe ser controlada de tal manera que no se produzcan grietas debido a la dilatación térmica.
- La **velocidad de enfriamiento** es la disminución de la temperatura del material en un determinado intervalo de tiempo, de este parámetro dependen las características finales de la aleación.

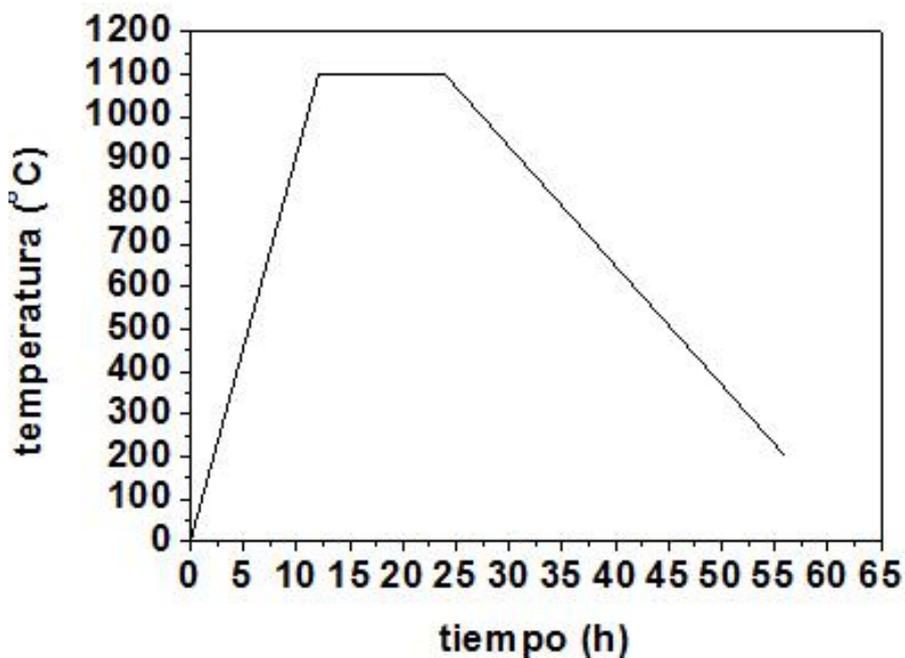


Figura 1. Representación del recocido de homogenización del acero 37CrNi3A (Sokolov, 1988)

1.2. Clasificación de los tratamientos térmicos aplicados a los aceros

En general los tipos de tratamientos térmicos primarios más destacados son: *recocido*, *normalizado* y *temple*. En la figura 2, se muestra el diagrama hierro-carbono que sirve para representar las transformaciones de equilibrio que sufren los aceros al carbono con la temperatura.

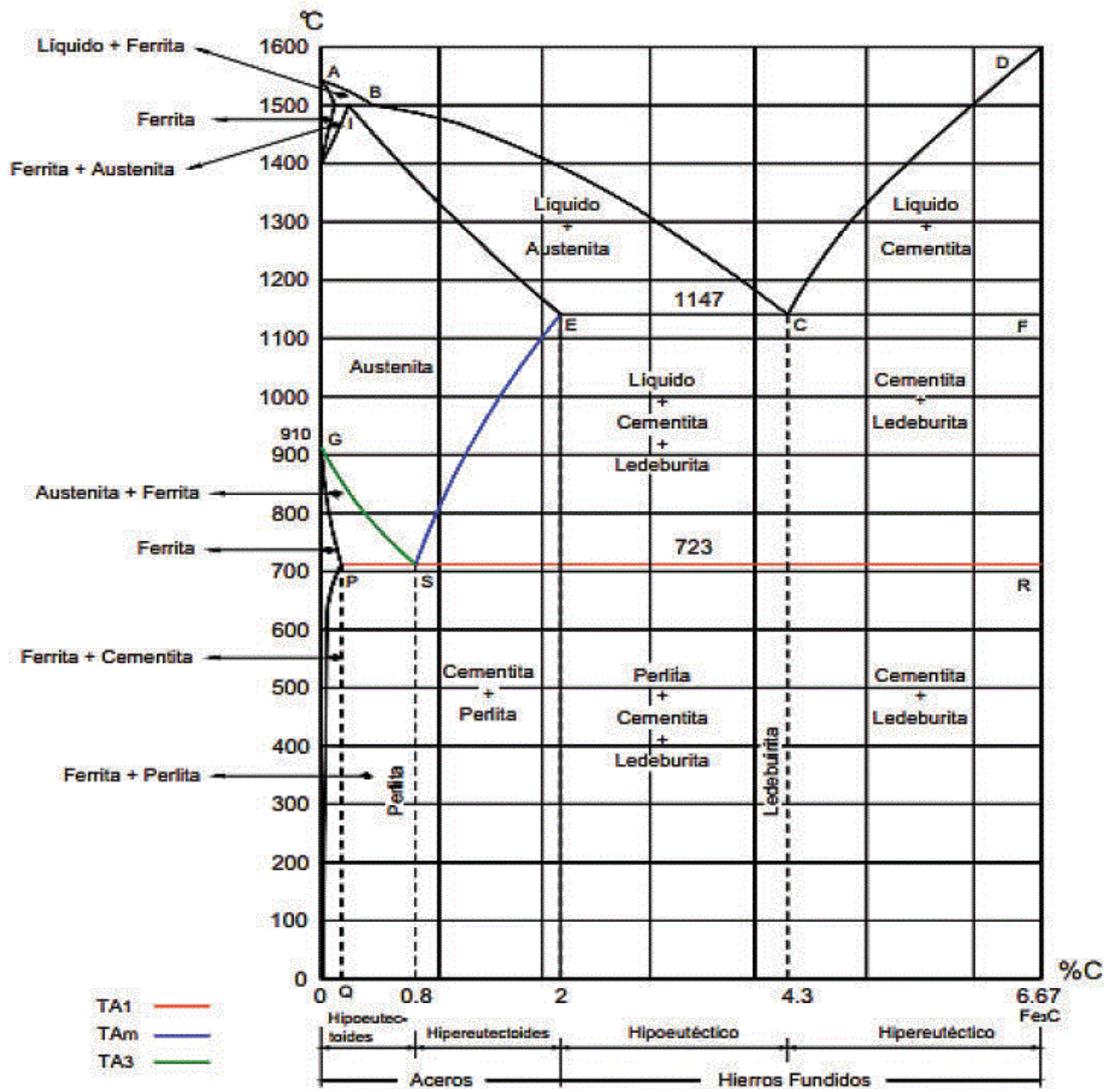


Figura 2. Diagrama hierro - carburo de hierro (Avner, 1992)

El recocido es un tratamiento que consiste en el calentamiento del material a la temperatura crítica superior que está entre 800 y 925 °C, un posterior mantenimiento y finalmente un enfriamiento lento dentro del horno o usando algún material aislante del calor; el propósito del recocido es aliviar tensiones generadas por un proceso previo, incrementar la ductilidad o elasticidad al reducir la resistencia mecánica y la dureza de los materiales y finalmente homogenizar y refinar la estructura del grano (Torres, 2004).

El normalizado consiste en un calentamiento del material a una temperatura más elevada que la crítica superior A_{c3} o A_{c1} , seguida de un enfriamiento en aire tranquilo. Este tratamiento térmico busca mejorar las propiedades mecánicas como la dureza, resistencia a la tensión o para recuperar propiedades, que se hayan modificado por la aplicación de soldadura o por otro tratamiento en el material (Barreiro, 1984).

El temple consiste en un calentamiento del material a una temperatura más elevada que la crítica superior A_{c3} o A_{c1} , mantenerlo a esta temperatura por un tiempo determinado y posteriormente enfriarlo en un medio tal que permita superar el valor mínimo de velocidad de enfriamiento, de tal manera que se produzca la formación de martensita sin una estructura perlítica intermedia. Por medio del temple se busca endurecer y aumentar la resistencia del material (Giraldo, 2009, Barreiro, 1984).

1.3. Tipos de hornos para tratamientos térmicos

Los hornos son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales, piezas o elementos, colocándolos en su interior por encima de la temperatura ambiente, el objeto de este calentamiento puede ser fundir, ablandar para una operación de conformado posterior, tratar térmicamente un material para impartir determinadas propiedades y llevar el material a la temperatura necesaria para producir las reacciones químicas en la obtención de un determinado producto (Pérez, 2008).

Para evitar ambigüedades se denominarán hornos a todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte del proceso, a temperatura superior al ambiente, realizándose el calentamiento de forma directa sobre las piezas o de forma indirecta por transmisión de calor desde otros elementos por mecanismos de conducción, convección y radiación. Los hornos para tratamientos térmicos se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios: por el proceso de calentamiento y por el tipo de solera (Corealla and Velasco, 2016).

1.3.1. Clasificación de los hornos según el proceso de calentamiento

El sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir, la cual es función de la naturaleza del material a tratar térmicamente y de las características del proceso de tratamiento.

Los **hornos de resistencias eléctricas** (figura 3) son aquellos en que la energía requerida para el calentamiento del material es de tipo eléctrico que se transforma en calor por medio de la resistencia óhmica. Las resistencias eléctricas dispuestas en el horno se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor (Estévez, 1988).



Figura 3. Horno de resistencia eléctrica (Bautermic, 2014)

Los **hornos de calentamiento por gas** tienen como ventaja la economía y como dificultad el control de la temperatura (Plana, 1991). En estos hornos la temperatura suele alcanzar los 1100°C y el control de la atmósfera es muy difícil. Su principal ventaja radica en la rapidez de tratamiento, la ausencia de oxidación y la facilidad de manejo. En la figura 4 se muestra un horno de calentamiento por gas o combustible.



Figura 4. Horno industrial calentado por gas (HIRE, 2019)

1.3.2. Clasificación de los hornos según el tipo de solera

La solera es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal o los materiales a calentarse. Como soporta la carga del material debe ser suficientemente sólida, y químicamente estable. Esta solera se puede clasificar en móvil y fija. En las figuras 5 y 6 se muestran los hornos de solera móvil y fija.



Figura 5. Horno de solera móvil (Nabertherm, 2018)



Figura 6. Horno de solera fija (Nabertherm, 2018)

1.4. Partes constituyentes de un horno de tratamiento térmico

Todos los hornos de tratamiento térmico se distinguen de acuerdo a los fines con que fueron ideados y presentan características apropiadas para cada caso, dependiendo de los requerimientos de diseño, a pesar de aquello, tienen toda una serie de elementos constructivos comunes.

La **zona de trabajo (cámara del horno)** es la parte principal del horno, en esta se realiza el proceso para el cual se ha diseñado, en general esta zona se separa del ambiente por medio de la bóveda.

La **solera** es la parte sobre la cual se sitúa el metal o los materiales a calentarse. Este debe ser suficientemente rígido para soportar el impacto mecánico durante los procesos de tratamiento térmico.

La **bóveda** (comprende todas las paredes y la solera que a su vez están constituidas de materiales refractarios y termoaislantes) es una parte muy importante del horno porque soporta altas temperaturas y tiene la función de reducir las pérdidas de calor del horno (Parra, 2008)

Los **canales** sirven para conducir los gases hasta la chimenea y suelen ser de sección rectangular y de techo plano o abovedado.

La **estructura metálica** es el esqueleto del horno porque soporta todas sus partes y absorbe los esfuerzos originados en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo (Corealla and Velasco, 2016)

La **puerta** permite el paso para cargar y descargar los materiales. Esta puede ser de tipo bisagra o levadizo.

1.5. Materiales utilizados en la construcción de hornos para tratamiento térmico

Los hornos para el tratamiento térmico están constituidos por los siguientes elementos (Trinks, 1971): carcasa (estructura metálica), fuente de calor (resistencias eléctricas), cámara de calentamiento (paredes del horno) y controladores de temperatura (termopares) (figura 7).

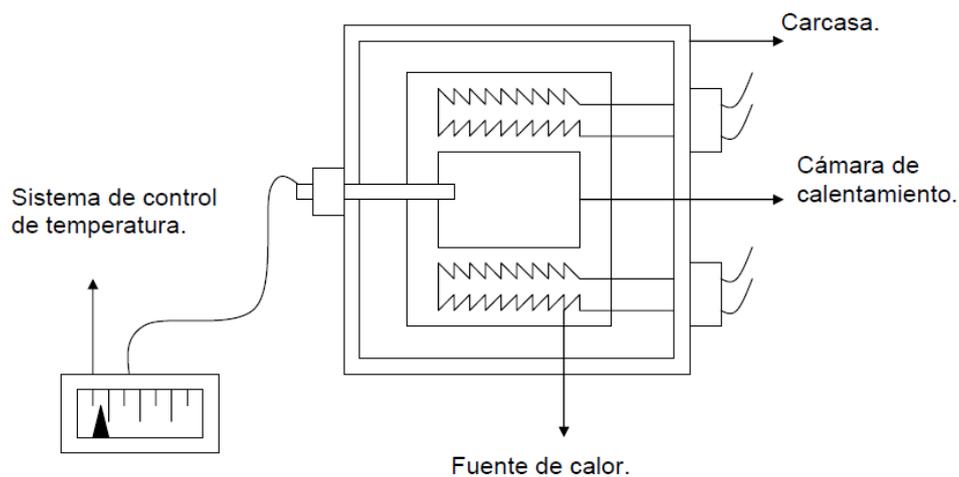


Figura 7. Partes constitutivas de los hornos (Trinks, 1971)

Entre la carcasa (estructura metálica) y la cámara de calentamiento, forman la estructura interna (paredes del horno) que está formada por: capa refractaria y capa aislante (figura 8).

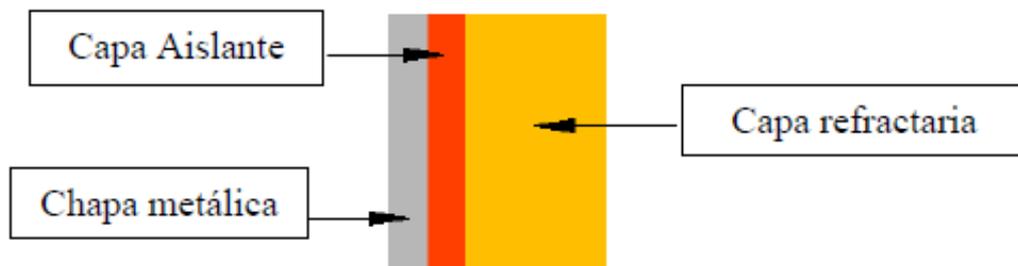


Figura 8. Conformación de la estructura interna de los hornos (Trinks, 1971)

En la estructura metálica suele utilizarse el acero *ASTM A36*. El espesor de la chapa metálica está dado por las necesidades del sistema y se escoge de acuerdo a los espesores disponibles en el mercado metalúrgico. En el anexo 1 se pueden observar los espesores disponibles (Ipac, 2017).

La capa refractaria (anexo 10) está compuesta por materiales resistentes a temperaturas elevadas, superiores a los 1500°C. Esta capa suele ser de ladrillos refractarios y cementos refractarios.

Los ***ladrillos refractarios*** se caracterizan por su baja densidad, la cual les confiere una baja conductividad térmica. Son fabricados con materias primas especiales para obtener alta porosidad, baja densidad y alta refractariedad. Uno de los que se emplean con frecuencia son *ladrillos de arcilla refractaria* con dimensiones estándar (anexo 2) (Uruca, 2016).

Los ***cementos refractarios*** están constituidos por una mezcla de áridos refractarios finamente molidos, de arcillas plásticas, aditivos y ligantes especiales. Aunque la técnica de colocación de ladrillos que se utiliza para el mortero refractario se asemeja a la utilizada para el cemento Portland. Son algunos de ellos empleados: *Ultra Green-80* y *KS-4* (Uruca, 2016).

La capa aislante (anexo 11) cumple doble propósito: reducir las pérdidas de calor y conseguir condiciones ambientales suficientemente aceptables durante la operación de calentamiento y fundición. El aislante debe tener la menor conductividad térmica posible y suele utilizarse: lana de *vidrio*, *manta cerámica* y *diatomita*.

En los hornos eléctricos de cámara y en los de baño, la fuente de calor está constituida por una resistencia alimentada por energía eléctrica (figura 9). El

calentamiento por resistencia eléctrica puede ser directo cuando la corriente eléctrica pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan por radiación, convección o combinación de ambas. En la industria es más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Los materiales empleados para la fabricación de resistencias metálicas se pueden clasificar en dos grupos: aleaciones de base *Ni-Cr* (*NIKROTHAL*) y aleaciones *Fe-Cr-Al* (*KANTHAL*) (Carter, 2010).



Figura 9. Resistencias Eléctrica (Ecuador, 2013)

Las **aleaciones de base Ni-Cr**, aunque varían ligeramente de unos fabricantes a otros, podemos considerar como más representativas las siguientes: $78,5Ni-20Cr-1,5Si$ (80-20), $68,5Ni-30Cr-1,5Si$ (70-30), $68Ni-20Cr-8,5Fe-2Si$, $60Ni-16Cr-22Fe-1,5Si$ y $35Ni-20Cr-43Fe-1,5Si$. En el anexo 3 (Metalshandbook, 2010), se presentan sus principales características.

Las **aleaciones Kanthal** cuentan con elementos químicos que producen la envoltura protectora de la resistencia, en este caso el aluminio (Al), formando una densa capa en atmósferas oxidantes, podemos considerar como más representativas las siguientes: $83,5Fe-13Cr-3,25Al$, $73,5Fe-22Cr-4,5Al$ y

72,5Fe-22Cr-5,5Al. Se pueden verificar las principales características de estas aleaciones en el anexo 4 (Metalshandbook, 2010).

Las resistencias eléctricas, en cuanto a la forma de su disposición, pueden ser:

- Arrollado en espiral sobre tubos cerámicos (figura 10)
- Arrollado en espiral sobre ranuras cerámicas (figura 11)
- Ondulados con soportes de gancho (figura 12)

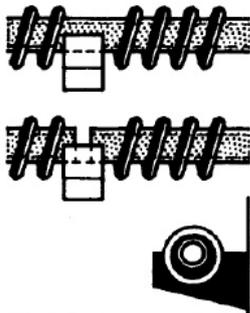


Figura 10. Alambre en espiral sobre tubos (Astigarraga, 1998)

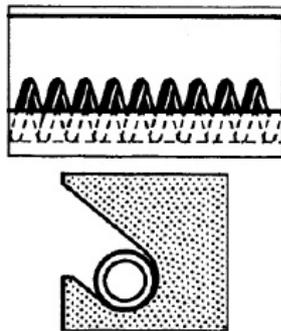


Figura 11. Alambre en espiral sobre ranuras (Astigarraga, 1998)

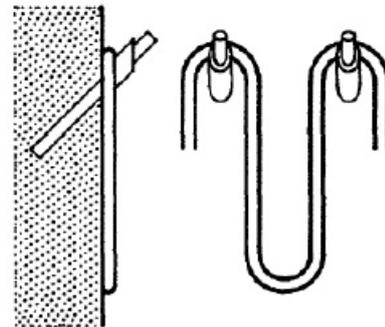


Figura 12. Ondulado sobre ganchos (Astigarraga, 1998)

A continuación, se muestran varias disposiciones de arrollados (alambre en espiral sobre tubos cerámicos, alambre en espiral sobre ranuras y ondulado con soportes de gancho) en bóveda, pared lateral y solera, sobre los materiales refractarios (ladrillos) (figura 13, 14 y 15).

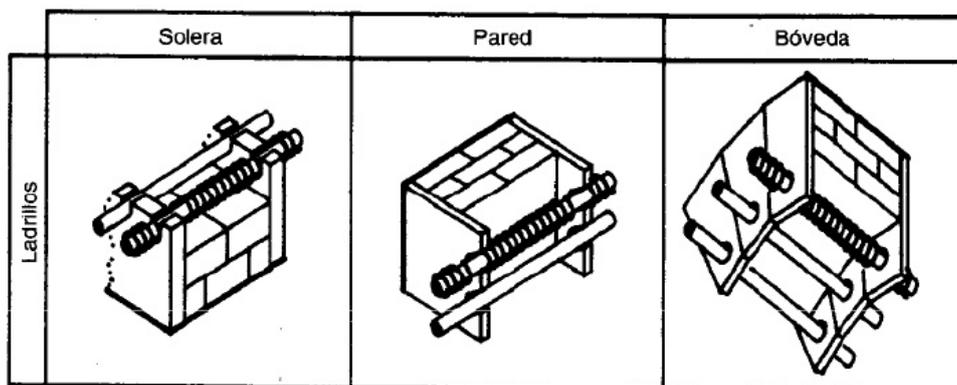


Figura 13. Disposiciones de espirales sobre tubos (Astigarraga, 1998)

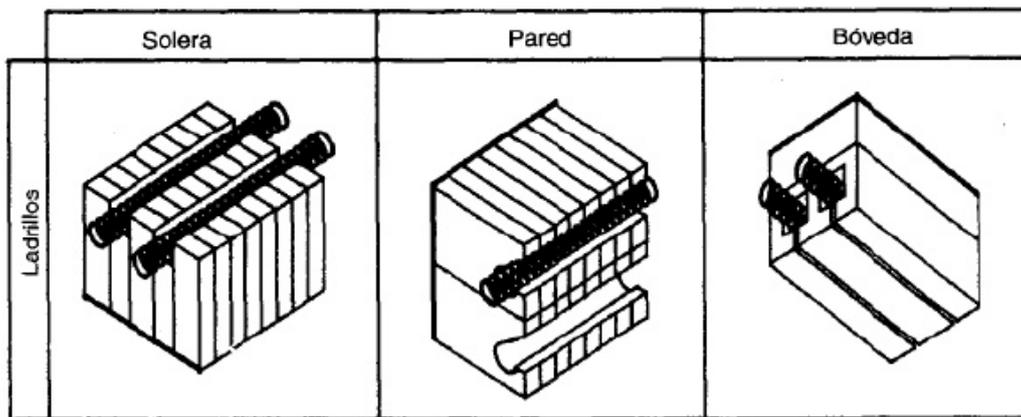


Figura 14. Disposiciones de espirales sobre ranuras (Astigarraga, 1998)

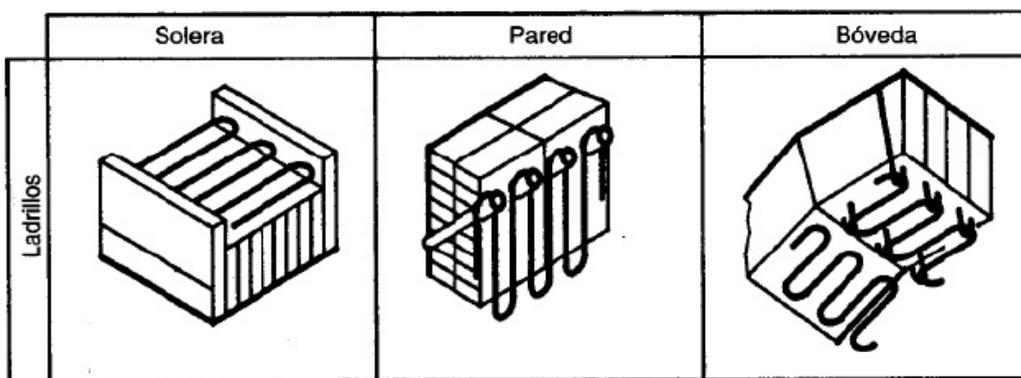


Figura 15. Disposiciones de varilla ondulada sobre ganchos (Astigarraga, 1998)

Los termopares se definen como sensores de la temperatura y se conforman con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente), de manera que al aplicar calor en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura (Arian, 2016). En la figura 16 se muestra un esquema típico de un termopar. En el anexo 5 (Termopares, 2003), se muestra algunos de los tipos de termopares existentes en el mercado.

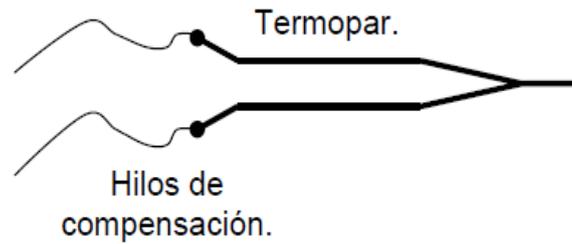


Figura 16. Esquema de un termopar (Creus, 1997)

1.6. Mecanismos de transferencia de calor presentes en los hornos de tratamiento térmico

Durante los procesos de tratamiento térmico ocurren diferentes mecanismos de transferencia de calor, la cual se define como *“la energía en tránsito debida a una diferencia de temperaturas”* (Chapman, 2001). En general se tienen tres modos o mecanismos de transferencia de calor: **conducción**, **convección** y **radiación**. Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados, estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo (Kreith, 2001).

1.6.1. Mecanismo de transferencia de calor por conducción

La conducción (figura 17), es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos, cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura. El calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas (Cengel, 2004).

La ley Fourier establece que “la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección” (ecuación 1) (Holtman, 1998).

$$Q_{Cond} = -k * A * \frac{\partial T}{\partial x} = -k * A * \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) \dots (1)$$

Donde:

Q_{Cond} – razón de transferencia de calor por conducción, (W)

k – conductividad térmica, (W/m°K)

A – área normal a la dirección del flujo de calor, (m²)

T_1 y T_2 – temperaturas más elevada y menos elevada, (°K)

L – espesor de la pared, (m)

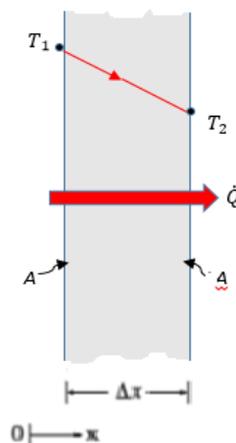


Figura 17. Transferencia de calor por conducción (Rose, 2008)

1.6.2. Mecanismo de transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección (figura 18) se da entre una superficie sólida y un fluido. Cuando un fluido a la temperatura T_F se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_S , al

proceso de intercambio de energía térmica se denomina convección (Queen, 1986).

La transferencia de calor por convección se expresa con la ley del enfriamiento de Newton que dice: *“la tasa de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores”* (ecuación 2) (Queen, 1986).

$$Q_{Conv} = h * A * (T_S - T_F) \dots (2)$$

Donde:

Q_{Conv} – razón de transferencia de calor por convección, (W)

h – coeficiente de transmisión del calor por convección, (W/ m². °K)

A – área normal a la dirección del flujo de calor, (m²)

T_S – temperatura de la superficie sólida, (°K)

T_F – temperatura del fluido, (°K)

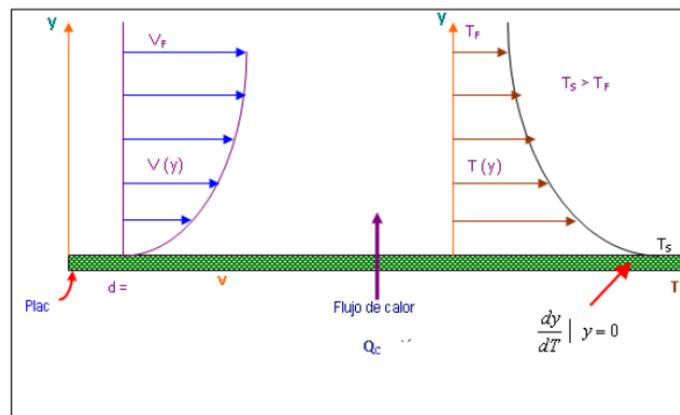


Figura 18. Transferencia de calor por convección (Incropera, 1999)

1.6.3. Mecanismo de transferencia de calor por radiación

La radiación térmica (figura 19) es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, ésta puede provenir de sólidos, líquidos y gases; sin importar la forma de la materia.

La transferencia de energía por radiación se puede tratar con razonable exactitud, si se llama cuerpo negro a un cuerpo perfectamente emisor o absorbente, esto se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann que establece lo siguiente: *“un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total proporcional a la cuarta potencia de su temperatura”* (ecuación 3) (Mills, 2015).

$$Q_{rad} = \sigma * A * T_S^4 \dots (3)$$

Donde:

Q_{rad} – razón de transferencia de calor por radiación, (W)

σ – constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^{-8}$, (W/m².K⁴)

A – área normal a la dirección del flujo de calor, (m²)

T_S – temperatura absoluta de la superficie sólida, (°K)

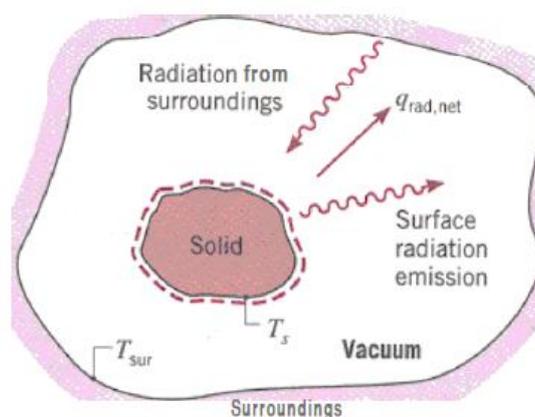


Figura 19. Transferencia de calor por radiación (Incropera, 1999)

2. DESARROLLO

2.1. Recomendaciones sobre el dimensionamiento de un horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico

2.1.1. El dimensionamiento de la cámara de trabajo de un horno para tratamiento térmico

La cámara de trabajo de los hornos de tratamiento térmico se caracteriza por sus dimensiones útiles y por las dimensiones totales. Las dimensiones útiles son aquellas que conforman el espacio donde se coloca la carga. Las dimensiones totales se definen de manera que exista un espacio libre entre el espacio ocupado por la carga y el espacio total de la cámara, evitando así el contacto directo entre la carga y las paredes interiores del horno.

De acuerdo con la literatura las dimensiones útiles de la cámara de un horno de tratamiento térmico dependen, en principio, de las dimensiones y la cantidad de piezas a tratar, de manera que el dimensionamiento garantice la colocación de la(s) pieza(s) en su interior y la productividad horaria (P_h - Kg/h) establecida (Teleguin and Avdeva, 1985). Esto es lo que se puede entender como el dimensionamiento a la medida. El horno cuya cámara sea dimensionada en base a este principio tendrá una eficiencia dentro de los parámetros recomendados (productividad horaria relativa=100-150 kg/hm², consumo de energía=1300-1100 kJ/kg, KPD=50-55 %, (Teleguin and Lebediev, 1975)) solamente cuando la carga se corresponda a la definida específicamente para su diseño (Kowalik and Jarosław, 2015).

En ocasiones, se puede dar el caso de que se necesita fabricar o adquirir un horno de tratamiento térmico para una producción variable en cuanto a dimensiones y cantidad de piezas. El abordaje del problema del dimensionamiento en este segundo caso no se encuentra descrito en la literatura especializada. No obstante, se considera que el mismo ha de ser de dominio de los fabricantes de hornos de tratamiento térmico, por cuanto en sus catálogos se ofertan equipos con dimensiones establecidas, no sujetas al procesamiento de una carga en específico. Para este caso es para el que se requiere una alternativa de solución o recomendación, la cual podría ser la que se propone a continuación:

a) determinar el área útil de la cámara a partir de la productividad horaria (P_h) (la cual se establece según intereses de la industria) y la productividad relativa (por unidad de superficie, P_{hA}); la cual para hornos eléctricos de tratamiento térmico de cámara debe estar entre 120 y 150 $kg h^{-1} m^{-2}$ (Teleguin and Lebediev, 1975)). Como resultado de la razón entre el primer y segundo parámetro (ecuación 4) se obtiene el área útil del piso de la cámara del horno (A_u), que es el parámetro principal del cual se derivan las dimensiones útiles.

$$A_u = P_h / P_{hA} \dots (4)$$

b) definir las tres dimensiones principales de la cámara como: ancho útil del piso del horno b , profundidad útil l , altura útil h y establecer el sistema de ecuaciones 5, 6, 7; el cual parte de la consideración de que existe una proporción entre las dimensiones de la cámara definida por los coeficientes k_1 y k_2 .

$$A_u = b * l \dots (5)$$

$$l = k_1 * b \dots (6)$$

$$h = k_2 * b \dots (7)$$

Para resolver el referido sistema de ecuaciones basta con conocer el valor de los coeficientes k_1 y k_2 . Este valor puede ser obtenido a partir de un análisis de las dimensiones de diferentes hornos de tratamiento térmico comercializados por varios fabricantes (anexo 6, 7 y 8). Los resultados de este tipo de análisis se muestran en la tabla 1. De acuerdo con estos resultados se puede plantear que el valor de k_1 se encuentra entre 1,41 y 1,55; mientras que el de k_2 se encuentra entre 0,70 y 0,78. Se debe destacar que los valores obtenidos están cercanos a los referidos en (Кузьменко and Тихомиров, 2008).

Tabla 1. Resultados del análisis de las dimensiones de la cámara útil de hornos de diferentes fabricantes.

	l/b				h/b		
	BOREL	NABERTHERM	SNOL		BOREL	NABERTHERM	SNOL
1	1,43	1	1,08	1	0,86	0,56	0,69
2	1,71	1,4	0,91	2	0,86	0,56	0,81
3	1,2	1,4	1,52	3	0,8	0,56	0,76
4	1,6	1	1,48	4	0,8	0,71	0,48
5	2	1,43	1,52	5	0,8	0,71	0,64
6	1,14	1,5	1,66	6	0,71	0,5	1
7	1,43	1,36	1,96	7	0,71	0,73	1,04
8	1,71	1,47	1,94	8	0,71	0,53	0,68
9	1,43	1,5	1,94	9	1	0,5	0,81
10	1,25	1,36	1,94	10	1	0,73	0,97
Resultados por fabricante				Resultados por fabricante			
media	1,49	1,34	1,60	me	0,83	0,61	0,79
IC _{95%}	0,06	0,04	0,08	IC ₉	0,02	0,02	0,04
e _r	3,99	3,10	5,20	e _r	2,91	3,59	4,99
Resultados de todos los fabricantes				Resultados de todos los fabricantes			
media	1,48			me	0,74		
IC _{95%}	0,07			IC ₉	0,04		
e _r	4,45			e _r	4,79		

El ancho total **B** y la profundidad total **L** de la cámara del horno se obtienen como resultado de adicionar entre 150 y 200 mm a ambos lados del ancho útil, la profundidad útil, la altura total **H** se obtiene al adicionar entre 150 y 200 mm a la altura útil. En la figura 20 se muestra un croquis de la cámara del horno.

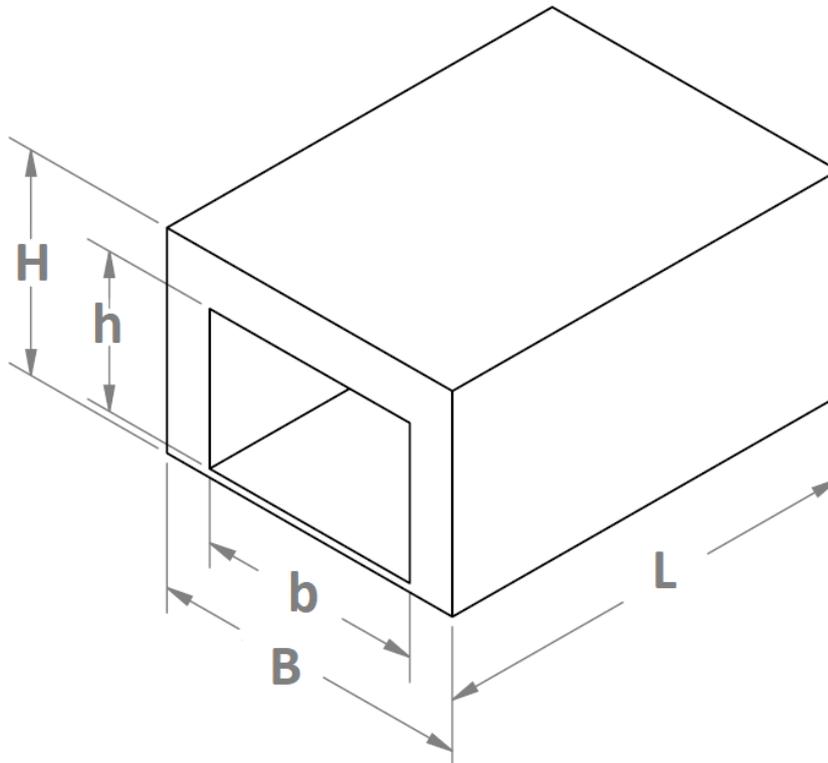


Figura 20. Croquis de la cámara del horno

2.1.2. El balance de energía térmica en hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico

2.1.2.1. Generalidades sobre el balance de energía térmica en hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico

El balance de energía térmica en hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico se sustenta en el principio de conservación de la energía (o balance de energía). Según dicho principio, el cambio en la energía

total de un sistema en el curso de un proceso ($\Delta E_{sistema}$) es igual a la diferencia entre la energía total que entra (E_e) y la energía total que sale (E_s) durante el desarrollo del proceso (transferencia de energía), lo cual se puede expresar a manera de balance de energía (ecuación 8) o balance de la razón de transferencia de energía (ecuación 9) (Çengel and Ghajar, 2011).

$$E_e - E_s = E_{sistema} \dots (8)$$

$$\frac{dE_e}{d\tau} - \frac{dE_s}{d\tau} = \frac{dE_{sistema}}{d\tau} \dots (9)$$

La energía total que entra al sistema (horno periódico de resistencia eléctrica para tratamiento térmico) está dada por la transformación de la energía eléctrica, suministrada a través de las resistencias eléctricas, en energía térmica. La energía total que sale se relaciona con las pérdidas a través de las paredes del horno, los dispositivos conectados con el exterior, las puertas abiertas (durante la carga y descarga del horno) y otras. El cambio en la energía total del sistema en el curso del proceso está dado por el calentamiento de la carga y dispositivos de carga, la atmósfera interior y las paredes del horno. Sobre esta base las ecuaciones 8 y 9 toman la forma de las ecuaciones 10 y 11 para el balance de energía o de la razón de transferencia de la misma, respectivamente (ISO/WD13579-1, 2009).

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 \dots (10)$$

$$\begin{aligned} dQ_e/d\tau = dQ_1/d\tau + dQ_2/d\tau + dQ_3/d\tau + dQ_4/d\tau + dQ_5/d\tau + dQ_6/d\tau \\ + dQ_7/d\tau \dots (11) \end{aligned}$$

Donde:

Q_e – energía de entrada

Q_1 – energía térmica empleada en calentar la carga y dispositivos de carga

Q_2 – pérdidas de energía térmica a través de las paredes del horno

Q_3 – pérdidas de energía térmica a través de la puerta de carga y descarga

Q_4 – pérdidas de energía térmica mediante elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior

Q_5 – energía térmica necesaria para calentar el aire que entra en la cámara

Q_6 – energía térmica necesaria para el calentamiento de las paredes del horno

Q_7 – otras pérdidas de energía térmica no contempladas

Se debe señalar que para hacer uso de la ecuación 10 es necesario conocer la masa de la carga y el tiempo que dura el proceso, lo que implica que el balance de energía térmica del horno depende de cada proceso de tratamiento térmico que se realiza. En el caso tratado en el presente trabajo, cuando el horno se destina a un uso versátil (en cuanto a masa de la carga y tiempo del proceso) solo se conoce la productividad horaria (establecida en función de las necesidades productivas); en este caso solamente se puede hacer uso de la ecuación 11.

2.1.2.2. Razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga

El punto de partida para la determinación de la razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga, hasta la temperatura de tratamiento térmico, es el calor específico del material que los compone, ya que establece la cantidad de energía térmica

requerida para incrementar en 1 grado la temperatura de la unidad de masa del material. Para el caso del acero calentado desde la temperatura ambiente hasta la temperatura T , el valor medio del calor específico se puede estimar por la ecuación 12 (Соболев et al., 2015)

$$\overline{C_e} = 0,4943 - 0,1042 * 10^{-3} * T + 0,7168 * 10^{-6} * T^2 - 0,4094 * 10^{-9} * T^3 \dots (12)$$

Donde:

$\overline{C_e}$ – valor medio del calor específico del acero calentado desde la temperatura ambiente hasta la temperatura T , (kJ/(kg °C))

T – temperatura a la que es calentada la carga, (°C)

La razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga hasta la temperatura de tratamiento térmico se determina como el producto resultante de la multiplicación de la productividad (masa tratada térmicamente por unidad de tiempo) por el valor medio del calor específico por la variación de temperatura experimentada por el material (ecuación 13) (Pérez and Cintra, 1985).

$$dQ_1/d\tau = P * \overline{C_e} * (T_f - T_i) \dots (13)$$

Donde:

$dQ_1/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos, (W)

P – productividad, (kg/s)

T_f y T_i – temperatura final e inicial del material durante el calentamiento, (°C)

2.1.2.3. Razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes del horno

Para la determinación de la razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes de los hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico primeramente hay que tener en consideración el punto de vista constructivo, el cual responde por aspectos de la resistencia mecánica. En este sentido se plantea que las paredes se conforman de dos capas (refractaria y aislante) de manera que el espesor de las paredes se establece en función de la altura y la temperatura de la pared (tabla 2) (Карамышева and Мклакова, 2009).

Otro aspecto a tener en cuenta es el relacionado con las condiciones de transferencia de calor. Debido a que el interior del horno se encuentra a una temperatura mayor que el exterior (figura 21), la energía perdida por las paredes está dada por el flujo de calor por conducción que se origina desde el interior del horno hacia el exterior.

Tabla 2. Espesor recomendado para las paredes de los hornos periódicos de resistencia eléctrica para tratamiento térmico en función de la altura y la temperatura de la pared (Карамышева and Мклакова, 2009)

Altura de la pared, m	Temperatura de la pared, °C	Espesor de la pared, mm	
		refractario	aislante
Hasta 1	Hasta 1 000	116	116 - 232
	1 000 – 1 200	232	232
	Más de 1 200	232	348
Entre 1 y 2	Hasta 1 200	232	232
	Más de 1 200	232 - 348	348
Hasta 3	1 000 – 1 200	348	232

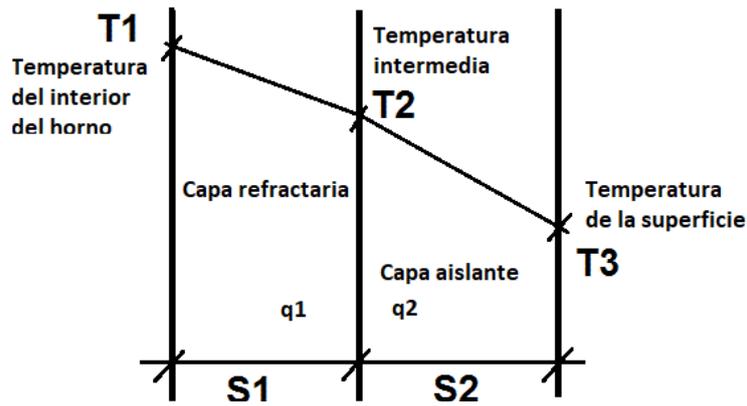


Figura 21. Esquema de la distribución de la temperatura entre las paredes.

Las paredes del horno pueden ser consideradas como un sistema que una vez alcanzado el equilibrio térmico se encuentra en régimen estacionario; esto permite aplicar la ley de Fourier de la conducción del calor. Según esta ley la razón de la conducción de calor a través de una bicapa plana es constante y proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa (Çengel and Ghajar, 2011).

Estas consideraciones permiten llegar a la ecuación 14 que representa la razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes del horno:

$$dQ_2/d\tau = \frac{(T_1 - T_2) * F}{\left(\frac{s_1}{\lambda_1}\right)} = \frac{(T_2 - T_3) * F}{\left(\frac{s_2}{\lambda_2}\right)} \dots (14)$$

Donde:

$dQ_2/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes, (W)

T_1 – temperatura en el interior del horno, (°C)

T_2 – temperatura entre las capas de la pared del horno, (°C)

T_3 – temperatura de la superficie del horno, (°C)

S_1 y S_2 – espesor de la capa refractaria y aislante, (m)

λ_1 y λ_2 – coeficiente de conductividad térmica de los diferentes materiales que componen la pared del horno, (W/m*K)

F – área total de las paredes del horno, (m)

Debido a que la temperatura entre las capas de la pared del horno (T_2) no es conocida y que el coeficiente de conductividad térmica es dependiente de la temperatura no resulta sencillo resolver la ecuación 14. Por esta razón en la literatura se propone una solución mediante aproximaciones sucesivas y método gráfico (Зобнин and др, 1982). Sin embargo, estos inconvenientes pueden ser resueltos de la manera que se propone a continuación.

Dado que la conductividad térmica de los materiales utilizados como refractarios y aislantes varía con la temperatura de acuerdo a una ecuación lineal (tabla 3), para cada capa se tiene la ecuación correspondiente (ecuaciones 15 y 16). Sustituyendo las ecuaciones (15 y 16) en la ecuación (14) se obtiene la ecuación (17), a partir de la cual (agrupando y simplificando los términos semejantes) se llega a la ecuación de segundo grado (18), cuya solución permite determinar la temperatura entre las capas (ecuación 19) y posteriormente la razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes.

$$\lambda_1 = a_1 + b_1 \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \dots (15)$$

$$\lambda_2 = a_2 + b_2 \left(\frac{T_2 + T_3}{2} \right) \dots (16)$$

$$\frac{(T_1 - T_2)}{(S_1)} * \left(a_1 + b_1 \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \right) = \frac{(T_2 - T_3)}{(S_2)} * \left(a_2 + b_2 \left(\frac{T_2 + T_3}{2} \right) \right) \dots (17)$$

$$T_2^2 + \frac{\left(-a_1 - \frac{s_1}{s_2} a_1\right)}{\left(\frac{b_1}{2} - \frac{s_1}{s_2} \frac{b_2}{2}\right)} * T_2 + \frac{\left(a_1 * T_1 + \frac{b_1}{2} * T_1^2 + \frac{s_1}{s_2} a_2 * T_3 + \frac{b_2}{2} * \frac{s_1}{s_2} * T_3^2\right)}{\left(\frac{b_1}{2} - \frac{s_1}{s_2} \frac{b_2}{2}\right)} = 0 \dots (18)$$

$$T_2 = \frac{-g \pm \sqrt{g^2 - 4 * h}}{2} \dots (19)$$

Donde:

$$g = \frac{\left(-a_1 - \frac{s_1}{s_2} a_1\right)}{\left(\frac{b_1}{2} - \frac{s_1}{s_2} \frac{b_2}{2}\right)} \quad \text{y} \quad h = \frac{\left(a_1 * T_1 + \frac{b_1}{2} * T_1^2 + \frac{s_1}{s_2} a_2 * T_3 + \frac{b_2}{2} * \frac{s_1}{s_2} * T_3^2\right)}{\left(\frac{b_1}{2} - \frac{s_1}{s_2} \frac{b_2}{2}\right)}$$

Después de calcular la temperatura intermedia (ecuación 19) se procede al cálculo de la razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes (ecuación 14).

Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales refractarios y aislantes térmicos empleados en hornos térmicos (Çengel and Ghajar, 2011).

Material	Conductividad térmica (W/m*K)	Densidad (kg/m ³)
Ladrillo de chamota	0,6 – 0,00055*T	1 800
Chamota ligera	0,25 – 0,00022*T	1 000
Ladrillo de diatomita 700	0,17 – 0,00023*T	700
Ladrillo de diatomita 500	0,094 – 0,00022*T	500

2.1.2.4. Razón de transferencia de energía térmica a través de la puerta cuando el horno se carga y se descarga

La transferencia de energía a través de la puerta cuando el horno se carga y se descarga se realiza por radiación, en este caso la razón de transferencia de energía se determina por la ecuación 20 (Тычака and Гусовкого, 1983).

$$dQ_3/dt = \left(5,77 * \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] * Fp * \phi * f_\tau\right) \dots (20)$$

Donde:

$dQ_3/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica a través de la puerta de carga y descarga, (W)

T_1 – temperatura interna del horno, (K)

T_2 – temperatura ambiente, (K)

Fp – área de la puerta abierta, (m²)

ϕ – coeficiente de diafragma, dependiente de la geometría, las dimensiones de y el espesor de la puerta (tabla 4) (ISO/WD13579-1, 2009)

f_τ – fracción del tiempo total de tratamiento térmico que representa el tiempo de abertura de la puerta para la carga y descarga, toma valores entre 0,08 y 0,16 (Соколов, 1984)

Tabla 4. Coeficiente de diafragma (ISO/WD13579-1, 2009)

Geometría de la abertura	(Diámetro o el lado más corto más corto)/(espesor de la pared)							
	0,01	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6
<i>Círculo</i>	0,02	0,10	0,18	0,35	0,52	0,67	0,80	0,86
<i>Cuadrado</i>	0,02	0,11	0,20	0,36	0,53	0,69	0,82	0,87
<i>Rectángulo</i>	0,03	0,13	0,24	0,43	0,60	0,75	0,86	0,90

2.1.2.5. Razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior

La razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior ($dQ_4/d\tau$) representa una fracción de la razón de transferencia de energía térmica a través de las

paredes del horno ($dQ_2/d\tau$), la cual según la literatura se encuentra entre 0,50 y 1 (Pérez and Cintra, 1985) y se determina por la ecuación 21.

$$dQ_4/d\tau = (0,5 - 1,0) * dQ_2/d\tau \dots (21)$$

Donde:

$dQ_4/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior, (W)

$dQ_2/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes, (W)

2.1.2.6. Razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara

Para el caso del aire calentado desde la temperatura ambiente hasta la temperatura T , el valor medio de la capacidad calorífica se puede estimar por la ecuación 22 (Cоболев et al., 2015).

$$C_{aire} = 1,3012 + 0,6728 * 10^{-5} * T + 0,209 * 10^{-6} * T^2 - 0,1078 * 10^{-9} * T^3 \dots (22)$$

Donde:

C_{aire} – valor medio de la capacidad calorífica del aire calentado desde la temperatura ambiente hasta la temperatura T , (kJ/(m³°C))

T – temperatura a la que es calentada el aire, (°C)

La razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara cuando el horno se carga y se descarga se determina aplicando la ecuación (23).

$$dQ_5/d\tau = (0,22 * C_{aire} * T_1 * B * H * \sqrt{H} * f_\tau) \dots (23)$$

Donde:

$dQ_5/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara, (W)

B – ancho de la ventana, (m)

H – altura de la ventana, (m)

f_τ – fracción del tiempo total de tratamiento térmico que representa el tiempo de abertura de la puerta para la carga y descarga, toma valores entre 0,08 y 0,16 (Соколов, 1984)

2.1.2.7. Razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno

La razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno ($dQ_6/d\tau$), representa una fracción de la razón energía de entrada ($dQ_e/d\tau$) la cual según la literatura toma valores que se encuentran en el rango de 0,015 a 0,02 (Иоффе and др, 1981) y se halla aplicando la ecuación 24.

$$dQ_6/d\tau = (0,015 - 0,02) * dQ_e/d\tau \dots (24)$$

Donde:

$dQ_6/d\tau$ – razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno, (W)

$dQ_e/d\tau$ – razón de energía de entrada, (W)

Para determinar esta razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno se debe sustituir la ecuación (24) en la ecuación (11).

$$dQ_6/d\tau = (0,015 - 0,02) * dQ_e/d\tau \dots (24)$$

$$dQ_e/d\tau = dQ_1/d\tau + dQ_2/d\tau + dQ_3/d\tau + dQ_4/d\tau + dQ_5/d\tau + dQ_6/d\tau \dots (11)$$

Sustituyendo queda de la siguiente forma:

$$dQ_e/d\tau = dQ_1/d\tau + dQ_2/d\tau + dQ_3/d\tau + dQ_4/d\tau + dQ_5/d\tau \\ + ((0,015 - 0,02) * dQ_e/d\tau$$

Ahora se debe pasar el término semejante del miembro izquierdo $(0,015 - 0,02) dQ_e/d\tau$ al miembro derecho y así restando el otro término semejante:

$$(dQ_e/d\tau - ((0,015 - 0,02) * dQ_e/d\tau \\ = dQ_1/d\tau + dQ_2/d\tau + dQ_3/d\tau + dQ_4/d\tau + dQ_5/d\tau$$

Finalmente se suman los miembros que se encuentran a la derecha de la ecuación y se determina la energía total ($dQ_e/d\tau$) haciendo un simple despeje. Obtenido el valor de la energía total, se sustituye en la ecuación (24) y se determina la razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno.

La potencia del horno (P_{total}) se determina como la sumatoria de la razón de transferencia de energía ecuación 11.

$$P_{total} = dQ_e/d\tau$$
$$= dQ_1/d\tau + dQ_2/d\tau + dQ_3/d\tau + dQ_4/d\tau + dQ_5/d\tau + dQ_6/d\tau$$

2.1.2.8. Eficiencia del horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico

La eficiencia del horno no es más que la razón entre el flujo de energía que se requiere para calentar la carga y los dispositivos (Q_1) con el flujo de la energía de entrada del horno (Q_e).

$$\eta = \frac{Q_1}{(Q_e)} = \frac{dQ_1/d\tau}{(dQ_e/d\tau = P_{total})} \dots (25)$$

2.1.2.9. Potencia nominal del horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico

La potencia nominal debe tomar en consideración las pérdidas a través de las líneas eléctricas, así como las eventualidades desfavorables tales como caídas de voltaje y otras. Debido a esto, la potencia se afecta por un factor cuyo valor puede oscilar entre 1,25 y 1,5 y generalmente la potencia nominal se halla aplicando la ecuación (26) (Pérez and Cintra, 1985).

$$P_{nom} = (1,25 - 1,5) * P_{total} \dots (26)$$

2.1.3. Dimensionamiento de las resistencias eléctricas metálicas (calentadores) en hornos de tratamiento térmico

El objetivo principal del dimensionamiento de los elementos calentadores en hornos eléctricos de tratamiento térmico es seleccionar el material a emplear en los mismos, así como determinar sus dimensiones, esquema de conexión y distribución dentro de la cámara, de manera que se garanticen las condiciones adecuadas de explotación. Para este cálculo se parte del conocimiento de la potencia, las dimensiones y la tensión de alimentación del horno, así como la temperatura inicial y final de la carga (Соболева, 2015).

La temperatura inicial y final de la carga quedan establecidas por los requerimientos productivos, mientras que la tensión de alimentación se rige por las condiciones dadas en el lugar donde se instale el horno. La potencia y las dimensiones del horno son determinadas según las recomendaciones dadas en los epígrafes 2.1.1 y 2.1.2.

En dependencia de la temperatura de calentamiento de la carga se define la temperatura que alcanzan las resistencias eléctricas, sumándole a la primera entre 50 y 100 °C. En función del valor de la temperatura obtenido se selecciona el material de la resistencia de acuerdo con la tabla del anexo 9 (Metalshandbook, 2010).

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, el parámetro fundamental que caracteriza a las resistencias eléctricas de los hornos de tratamiento térmico, es el flujo de calor que puede ser transmitido por radiación desde su superficie. Para determinar este flujo se introduce el concepto de calentador eléctrico ideal, el cual no es más que aquel en el que toda la energía se

transmite por radiación del calentador a la carga (100% de eficiencia). En este caso el flujo de calor se determina mediante la ecuación 27.

$$W_i = \left(\frac{C_o}{\left(\left(\frac{1}{\varepsilon_C} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_H} \right) - 1 \right)} \right) * \left[\left(\frac{T_C}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_H}{100} \right)^4 \right] \dots (27)$$

Donde:

W_i – potencia específica superficial ideal, (W/m²)

C_o – constante de radiación de Stefan Boltzmann 5,67, (W/(m²K⁴))

ε_C y ε_H – emisividad del calentador y la carga respectivamente $\approx 0,83$ (Соболева, 2015)

T_C y T_H – temperatura del calentador y la carga respectivamente, (K)

Teniendo en cuenta que, en realidad, una parte del flujo de calor es irradiado por el calentador al revestimiento interior del horno y que existen pérdidas de energía por radiación al exterior, entonces se define el flujo real como una fracción del flujo ideal, expresada por el coeficiente α . Dicho coeficiente depende del material de la carga y la temperatura de calentamiento, así como de la forma de los calentadores y la manera de su colocación dentro del horno.

De acuerdo a recomendaciones prácticas, la forma de los calentadores y la manera de su colocación dentro del horno dependen de la razón entre la potencia nominal del horno por unidad de superficie interior que los aloja y la potencia específica superficial ideal (ecuación 28).

$$\frac{P_{nom}/A_p}{W_i} = \phi \dots (28)$$

Obtenido este valor se entra en la tabla 5 (Ioffe, 1981) y se escoge la forma de colocación dentro del horno.

Tabla 5. Valores recomendados de ϕ para seleccionar la forma y la manera de su colocación dentro del horno de los calentadores (Ioffe, 1981).

Colocación dentro del horno	Forma de los calentadores	
	Sección circular en espiral	Sección rectangular ondulado
Soportado por ganchos	0,9-0,95	0,9-0,95
Dentro de ranuras	0,75-0,8	0,7-0,75
Sobre placas en voladizo	0,65-0,7	0,6-0,65
Sobre tubos cerámicos	0,95-1	-

Para el caso de una carga de acero - sometida a temple, normalizado o recocido - los valores del coeficiente α se dan en la tabla 6 (Logachev, 2010).

Tabla 6. Valores del coeficiente α , para el caso de una carga de acero sometida a temple, normalizado o recocido (Logachev, 2010).

Colocación dentro del horno	Forma de los calentadores	
	Sección circular en espiral	Sección rectangular ondulado
Soportado por ganchos	0,46	0,46
Dentro de ranuras	0,31	0,44
Sobre placas en voladizo	0,39	0,41
Sobre tubos cerámicos	0,46	-

La expresión para calcular el flujo real es:

$$W_{real} = \alpha * W_i \dots (29)$$

Donde:

W_{real} – flujo real, (W/m²)

W_i – potencia específica superficial ideal, (W/m²)

α – coeficiente de la fracción del flujo ideal. Tabla 6.

Para determinar los parámetros geométricos de las resistencias, se debe definir el tipo de conexión eléctrica que se va a emplear para el horno. Basándose en los catálogos de los fabricantes (Nabertherm, 2018) (SNOL, 2018) (Borel, 2018), normalmente los hornos industriales de resistencias eléctricas suelen conectarse en el sistema trifásico. El sistema trifásico puede conectarse en estrella o en delta (figura 22).

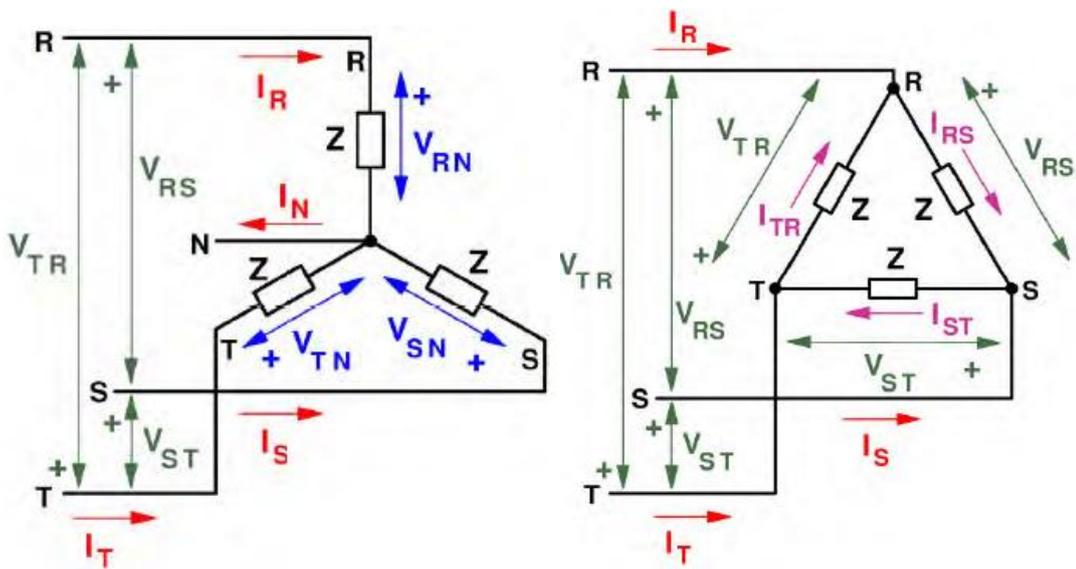


Figura 22: Conexión trifásica a.) estrella y b.) delta (Boylestad, 2014)

Los parámetros fundamentales para estas conexiones son expresados en las ecuaciones (30, 31 y 32).

Para conexión estrella

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots (30)$$

$$I_F = I_L \dots (31)$$

Para conexión delta

$$V_F = V_L \dots (30)$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \dots (31)$$

$$P_{nom} = P_F = \sqrt{3} * I_L * V_L * \cos\varphi \dots (32)$$

Donde:

V_F – voltaje de fase, (V)

V_L – voltaje de línea, (V)

I_F – corriente de fase, (A)

I_L – corriente de línea, (A)

P_{nom} – potencia nominal del horno, (W)

P_F – potencia de fase, (W)

φ – ángulo de fase, (°)

2.1.3.1. Diámetro (sección circular) o espesor/ancho (sección rectangular) de la resistencia eléctrica y su longitud

Desde el punto de vista geométrico los parámetros fundamentales que caracterizan los calentadores (resistencias eléctricas) son:

- diámetro (sección circular) o espesor y ancho (sección rectangular) – ecuaciones 33 y 34, respectivamente.
- longitud total de la resistencia - ecuación 35 para sección circular y ecuación 36 para sección rectangular, respectivamente.

$$d = 34,3 * \sqrt[3]{\frac{P_{R1}^2 * \rho}{V_F^2 * W_{real}}} \dots (33)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^3 * \rho * P_{R1}^2}{(2 * m * (m + 1)) * V_F^2 * W_{real}}} \dots (34)$$

$$l = \frac{V_F^2 * S}{P_{R1} * \rho * 10^3} \dots (35)$$

$$S = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$l = 0,1 * \sqrt[3]{\frac{2,5 * P_{R1} * V_F^2 * m}{((m + 1)^2 * \rho * W_{real})^2}} \dots (36)$$

$$\rho = \rho_{20^\circ C} * Ct$$

Para calcular el diámetro de la resistencia, se debe hallar la potencia necesaria para una resistencia (P_{R1}) (ecuación 37). Para esto, se debe conocer la corriente que pasa por esta misma resistencia (I_{R1}) (ecuación 38).

$$P_{R1} = V_F * I_{R1} \dots (37)$$

$$I_{R1} = I_{RT} = \frac{I_L}{n} \dots (38)$$

Donde:

d – diámetro de la resistencia, (mm)

a – ancho de la resistencia de sección rectangular, (mm)

P_{R1} – potencia para la resistencia, (W)

W_{real} – flujo real, (W/m²)

V_F – voltaje de fase, (V)

ρ – resistividad eléctrica a la temperatura de trabajo ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) $\rho = \rho_{20^\circ C} * Ct$

$\rho_{20^\circ C}$ – resistividad eléctrica a 20 °C de la aleación empleada para la resistencia eléctrica se toma del anexo 9.

Ct – coeficiente de resistividad o factor de temperatura se toma del anexo 9.

m – relación entre el ancho y el espesor de la resistencia rectangular, que normalmente toma un valor de 10 mm.

e – espesor de la resistencia de sección rectangular, (mm)

l – longitud de la resistencia, (m)

s – área de la sección de la resistencia, (m^2)

n – número de conexiones estrella o delta

I_{RT} – corriente para cada conexión en estrella

n – número de conexiones estrella o delta

I_{RT} – corriente para cada conexión en estrella

2.2. Guía del usuario de la herramienta computacional para el dimensionamiento de horno de cámara eléctrico para tratamiento térmico de aceros

Para efectuar el dimensionamiento de la cámara del horno, el análisis del balance térmico y el cálculo de las resistencias eléctricas, de manera automatizada, se propone aplicar la herramienta computacional desarrollada como parte del objetivo principal del presente trabajo, la cual se describe a continuación a manera de guía del usuario. La herramienta presenta tres módulos principales:

1. Módulo para el cálculo de las dimensiones de la cámara del horno.
2. Módulo para el balance de energía.
3. Módulo para el cálculo de las dimensiones de los calentadores eléctricos.

2.2.1. Descripción del módulo para el cálculo de las dimensiones de la cámara del horno

Para determinar las dimensiones de la cámara del horno, el usuario debe ingresar la productividad deseada, la cual para estos tipos de hornos debe estar entre 50 y 150 kg/h. Posteriormente debe elegir la productividad por unidad de superficie, la cual debe estar entre 120 - 150 (kg/h)/m² según las recomendaciones prácticas. La ventana para ingresar los datos tiene la siguiente estructura:

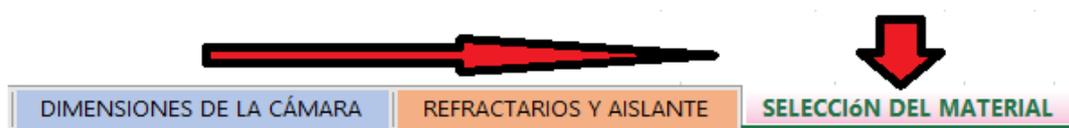
Ingrese la productividad	100	(kg/h)		
Ingrese la productividad por unidad de superficie	135	(kg/h)/m ²		

Automáticamente se calculan las dimensiones de la cámara útil del horno y las dimensiones totales de la cámara del horno. La ventana que imprime estos resultados tiene la siguiente estructura:

Dimensiones de la cámara útil del horno		
Área útil (Au)	0,74	(m ²)
Ancho útil (b)	0,70	(m)
Largo útil (l)	1,05	(m)
Altura útil de la cámara (h)	0,49	(m)
Dimensiones totales de la cámara del horno		
Ancho total (B)	1,0	(m)
Largo total (L)	1,35	(m)
Área total (At)	1,36	(m ²)
Altura total de la cámara (H)	0,69	(m)

2.2.2. Descripción del módulo para el balance energético del horno

Cuando se concluye el dimensionamiento de la cámara del horno, se debe hacer un cambio de hoja desde la hoja con el nombre DIMENSIONES DE LA CÁMARA a la hoja con nombre SELECCIÓN DE MATERIAL.



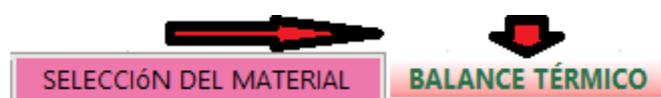
En la hoja SELECCIÓN DEL MATERIAL, el usuario debe ingresar la temperatura interior de las paredes del horno (temperatura de diseño del horno) y la temperatura exterior de las paredes (según recomendaciones debe estar entre 40 – 60 °C). Al concluir, se le pide al usuario para seleccionar los

materiales refractarios y aislantes que desea emplear para este cálculo. La selección de estos materiales se hace introduciendo números en el espacio correspondiente y que cada número representa un determinado material. Para los materiales refractarios los números correspondientes son (1 para Chamota Estándar, 2 para Chamota Normal y 3 para Chamota Ligera) y para los aislantes son (4 para Diatomita estándar, 5 para Diatomita 500 y 6 para Diatomita 700).

Posteriormente el usuario debe seleccionar el espesor del refractario y aislante que desea utilizar que según recomendaciones toma 3 valores que son (0,115; 0,230 o 0,345). Finalmente, al ingresar todos estos datos, se calcula la temperatura intermedia de las paredes que es importante para el cálculo del calor perdido entre las paredes. La ventana tendrá la siguiente estructura:

Pérdida de calor por las paredes del horno	
Temperatura interior de las paredes (°C)	1000
Temperatura exterior de las paredes (°C)	30
Seleccione el material refractario (REFRACTARIOS Y AISLANTES)	1
Seleccione el material aislante (REFRACTARIOS Y AISLANTES)	4
Seleccione espesor refractario (m)	0,23
Seleccione espesor aislante (m)	0,23
Cálculo de la temperatura intermedia de la pared (°C)	726

Después de haber seccionado los materiales a utilizar con sus respectivos espesores, se debe hacer un cambio de hoja desde SELECCIÓN DEL MATERIAL a BALANCE TÉRMICO.



En esta hoja, usuario ingresa el valor de la temperatura máxima para el calentamiento del acero en (°C) (se propone ingresar el valor de la temperatura de diseño del horno) y el valor de la temperatura inicial de entrada del acero al horno en (°C) (se asume que la temperatura de entrada del acero es igual a la del ambiente). La ventana que permite esto se muestra a continuación:

Ingrese el valor de la temperatura maxima para el calentamiento del acero	1000	(°C)
Ingrese la temperatura de inicial de entrada del acero	30	(°C)

Cuando se vaya ingresado estos valores, la herramienta determina todas las razones de transferencia que energía. La ventana que imprime estos resultados tiene la siguiente estructura:

1. Razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga		
Calor específico del acero a la maxima temperatura (C _E)	0,698	(kJ/(kg°C))
dQ1/dt	22,6	(kW)
2. Razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes del horno		
Área total de las paredes del horno	5,28	m ²
dQ2/dt	7,9	(kW)
3. Razón de transferencia de energía térmica a través de la puerta cuando el horno se carga y se descarga		
dQ3/dt	1,47	(kW)
4. Razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior		
dQ4/dt	5,51	(kW)
5. Razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara		
Capacidad calorífica del acero aire (C _{aire})	1,408	kJ/(m ³ °C)
dQ5/dt	1,67	(kW)
6. Razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno		
dQ6/dt	0,80	(kW)

7. Razón de transferencia de energía térmica total (potencia total del horno)		
dQ _e /dt	39,88	(kW)
8. Eficiencia del horno		
η	0,57	
9. Potencia nominal del horno		
P _{nom}	50,25	

Cuando se han determinado todas las razones de transferencia de energía, la herramienta tiene la capacidad de determinar el porcentaje que representa cada valor de todas las razones de transferencia de calor calculado. Estas razones se presentan en forma de tabla o en forma de un gráfico circular en tres dimensiones.

2.2.3. Descripción del módulo para el cálculo de las dimensiones de los calentadores eléctricos

Para realizar el cálculo de las resistencias eléctricas, se hace un cambio de hoja desde BALANCE TÉRMICO a RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.



En las ventanas iniciales de esta hoja, el usuario debe ingresar el valor de la tensión de alimentación donde se pretende instalar el horno (voltaje de línea) y el valor de la temperatura de diseño del horno. La ventana tiene la siguiente estructura:

Ingrese el valor de la tensión de alimentación del horno (VL)	440	(V)
Ingrese el valor de la temperatura máxima para el calentamiento del acero	1000	(°C)

Con esto la herramienta determina la temperatura de las resistencias eléctricas, la potencia específica superficial (flujo ideal). Esto se muestra en la figura siguiente:

1. Determinación de la temperatura de las resistencias eléctricas (T_c)		
T_c	1100,0	(°C)
2. Determinación de la potencia específica superficial ideal (flujo ideal) (W_i)		
W_i	35063	(W/m ²)

A continuación, el usuario debe ingresar el valor del área interior del horno donde se colocarán las resistencias eléctricas. Posteriormente se le devuelve al usuario un valor (que se halla efectuando la división de la potencia nominal del horno calculada en el balance térmico entre el área de las paredes que ingresó entre el flujo ideal). Esto muestra en la figura siguiente:

A_{plateral}	1,87	(m ²)
$\frac{P_{\text{nom}}}{A_p}$	0,76	
$\frac{P_{\text{nom}}}{A_p} / W_i$		

Este valor permite al usuario determinar la forma de colocación de las resistencias basándose en la tabla 1. Se debe verificar en que rango cae el valor determinado y posteriormente se procede en la ventana abajo que pide el usuario para ingresar la forma de la resistencia adecuada. Esta selección se hace con números donde (1 - para SOPORTADO POR GANCHOS, 2 - para

DENTRO DE RANURAS, 3 - para SOBRE PLACAS EN VOLADIZO y 4 - para SOBRE TUBOS CERAMICOS).

TABLA 1. Guía para el usuario para seleccionar la colocación de las resistencias dentro del horno			
Colocación	Forma de calentadores		
	Seccion circular en espiras	Seccion rectangular ondulado	
1	soportados por ganchos	0,9 - 0,95	0,9 - 0,95
2	dentro de ranuras	0,75 - 0,8	0,7 - 0,75
3	sobre placas voladizo	0,65 - 0,7	0,6 - 0,65
4	sobre tubos ceramicos	0,95 - 1	-
Seleccione la forma de colocación de las resistencias dentro del horno basándose en la tabla 1			2
Coeficiente α		0,31	

Se determina el flujo real multiplicando el flujo ideal con el coeficiente alfa calculado anteriormente y eso se muestra abajo:

5.Determinación del flujo real (Wreal)		
Wreal	1	(W/cm ²)

A continuación, el usuario ingresa el número de conexiones estrellas utilizados en el circuito. Debe ingresar también la cantidad de resistencias eléctricas que se pretenden instalar en cada fase. Con esto se calcula los parámetros del circuito eléctrico.

6. Determinación de los parámetros de circuito eléctrico para la conexión trifásica estrella			
Ingrese el número de conexiones utilizadas en el circuito trifásico		2	
Ingrese el número de resistencias eléctricas en cada fase		1	
Tensión de fase (V_F)	254	(V)	
Corriente de línea (I_L)	66	(A)	
Corriente para cada conexión en estrella (I_{RT})		33	(A)
Corriente para cada resistencia (I_{R1})		33	(A)
Potencia de cada resistencia (P_{R1})		8	(kW)

Para determinar los parámetros geométricos de las resistencias eléctricas, al usuario se le pide para que seleccione la aleación deseada correspondiente a la temperatura de las resistencias que se calculó al principio. La selección de la aleación se hace ingresando el número correspondiente a cada aleación que.

Estos números son:

1 - para temperatura=1150 °C => aleación (78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20))

2 - para temperatura=1200 °C => aleación (68,5Ni-30Cr-1,5Si (70-30))

3 - para temperatura=1150 °C => aleación (68Ni-20Cr-8,5Fe-2Si)

4 - para temperatura=1000 °C => aleación (60Ni-16Cr-22Fe-1,5Si)

5 - para temperatura=925 °C => aleación (35Ni-20Cr-43Fe-1,5Si)

6 - para temperatura=1050 °C => aleación (83,5Fe-13Cr-3,25Al)

7 - para temperatura=1280 °C => aleación (73,5Fe-22Cr-4,5Al)

8 - para temperatura=1350 °C => aleación (72,5Fe-22Cr-5,5Al)

Finalmente se determinan todos los parámetros geométricos que deben tener las resistencias eléctricas a utilizar.

7. Determinación del diámetro de la resistencia eléctrica (d)					
Seleccione la aleación de las resistencias en función de la temperatura de las mismas					1
Resistividad de la resistencia a 20 °C ($\rho_{20^{\circ}\text{C}}$)	1,08	$(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$			
Cambio promedio de la resistividad a 20 °C (Ct)		1,076			
ρ	1,162080000	$(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$			
Diámetro de la resistencia (d)	3,6	(mm)			
8. Determinación de la longitud de la resistencia eléctrica (L)					
Longitud de la resistencia (L)	67,7	(m)	S	10,21	(m^2)
9. Determinación del diámetro de las espiras de las resistencia eléctrica (D)					
Diámetro de la resistencia (D)	18	(mm)			
10. Determinación del paso de las espiras (s)					
Paso de la resistencia (s)	7	(mm)			
11. Determinación de número de las espiras (N)					
Número de las espiras (N)	1494				

2.3. Resultados prácticos del dimensionamiento de un horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico

De acuerdo con las recomendaciones descritas en el epígrafe 2.1, el dimensionamiento de un horno de tratamiento térmico contempla las siguientes etapas: dimensionamiento de la cámara, balance térmico y cálculo de las resistencias eléctricas. A continuación, se presenta un ejemplo de dimensionamiento de un horno eléctrico de cámara para tratamiento térmico de aceros, específicamente para recocido, normalizado o temple. Teniendo en cuenta que el horno ha de tener un uso versátil, entonces como punto de

partida únicamente se pueden definir los parámetros: temperatura de trabajo y productividad horaria.

La temperatura de trabajo se define de manera tal que se puedan alcanzar las temperaturas características de los tratamientos térmicos que se pretenden realizar; en este caso se recomienda 1 000 °C. La productividad horaria se define de acuerdo a las necesidades de la empresa y debe estar entre 50 y 150 *kg/h*, que son los valores frecuentes para los hornos con la finalidad similar a la del ejemplo que se analiza; en este caso se toma el valor intermedio de 100 *kg/h*.

2.3.1. Determinación de las dimensiones de la cámara del horno tomado como ejemplo

En la tabla 7 se muestran los resultados del dimensionamiento de la cámara del horno que se requiere, para lo cual se emplean las ecuaciones y recomendaciones dadas en el epígrafe 2.1.1. En la figura 23 se muestra un croquis de la cámara del horno, con sus respectivas dimensiones. Como resultado se obtiene que para alcanzar una productividad de 100 *kg/h*, el horno debe tener una cámara útil con dimensiones de 1000x1350x690 mm.

Tabla 7. Resultados del dimensionamiento de la cámara del horno que se requiere.

Parámetros calculados	Resultado	Ecuación empleada	Observaciones
Área útil de la cámara (Au)	0,74 m ²	4	PhA =135 kg/hm ²
Ancho útil de la cámara (b)	700 mm	5, 6 y 7	$k_1 = 1,5$ $k_2 = 0,7$
Profundidad de la cámara útil (l)	1 050 mm		
Altura útil de la cámara (h)	490 mm		
Ancho total del piso de la cámara (B)	1 000 mm	-	Se agrega 150 mm a ambos lados
Largo total del piso de la cámara (L)	1 350 mm	-	
Altura total del horno de la cámara (H)	690 mm	-	

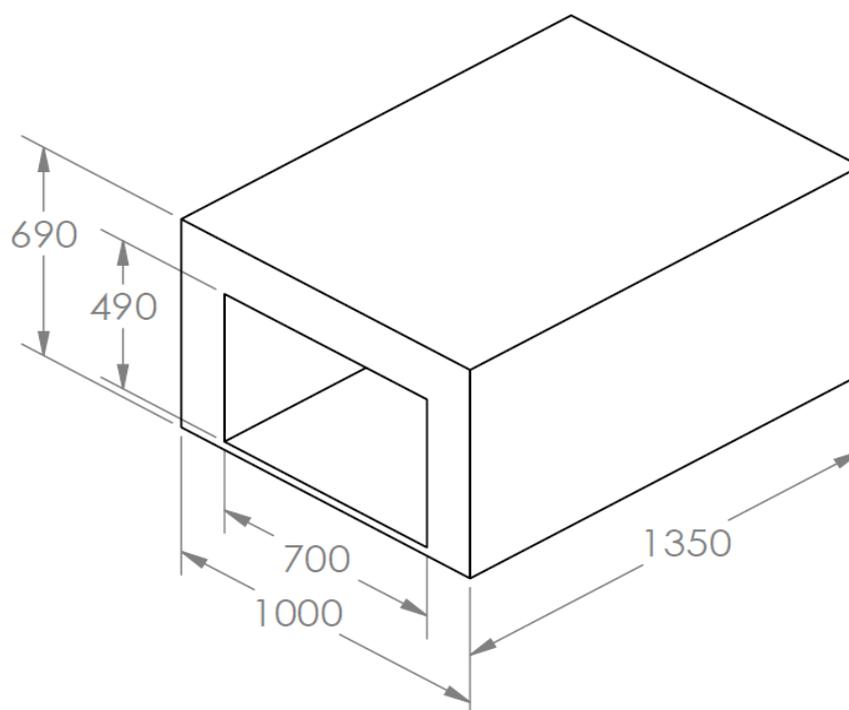


Figura 23. Croquis de la cámara del horno con las dimensiones calculados.

2.3.2. Balance de energía del horno tomado como ejemplo

El balance de energía está dirigido a la determinación de la potencia requerida por el horno para garantizar el calentamiento de la carga y cubrir las inevitables pérdidas de calor; también permite identificar el peso porcentual de cada uno

de los ítems que intervienen en los cálculos, lo cual es fundamental para valorar la eficiencia del dispositivo. En la tabla 8 se dan los valores del balance de energía para el horno analizado como ejemplo y en la figura 24 se muestra el aporte porcentual de cada ítem. Como se puede apreciar la demanda del horno es de 38 kW, lo que implica una potencia nominal (epígrafe 2.1.2.9) entre 47,5 y 57 kW. De acuerdo con estos resultados el horno garantiza un consumo específico de 0,38 kWh/Kg y una eficiencia del 60 %, las cuáles están dentro de los valores recomendados por la literatura (Sokolov, 1988)

Tabla 8. Resultados del balance de energía del horno

Ítems contemplados en el balance de energía	resultados	
	(W)	(%)
Razón de transferencia de energía térmica durante el calentamiento de la carga y los dispositivos de carga	22 500	59,6
Razón de transferencia de energía térmica a través de las paredes del horno	6 500	17,2
Razón de transferencia de energía térmica a través de la puerta cuando el horno se carga y se descarga	1 470	3,9
Razón de transferencia de energía térmica mediante los elementos que poseen partes en la cámara y partes en el exterior	4 880	12,9
Razón de transferencia de energía térmica requerida para calentar el aire que entra en la cámara	1 660	4,4
Razón de transferencia de energía térmica requerida para el calentamiento de las paredes del horno	756	2,0
Total	37 766	100,0



Figura 24. Gráfico de distribución porcentual de los diferentes ítems del balance de energía.

2.3.3. Cálculo de las resistencias eléctricas del horno tomado como ejemplo

Para este cálculo se parte del conocimiento de la potencia nominal del horno, las dimensiones del área que se pretende instalar las resistencias y la tensión de alimentación del horno, así como la temperatura final del horno que son:

Potencia nominal del horno: $P_{nom} = 50 \text{ kW}$

Tensión de alimentación del horno: $V_L = 440 \text{ V}$

Temperatura de diseño del horno: $T_H = 1\ 000 \text{ °C}$

Se decide utilizar 6 resistencias eléctricas en la cual se van a instalar 3 resistencias en cada pared lateral. Cada pared lateral va a formar un sistema de conexión trifásico conectado en estrella. En la figura 24 se muestra el esquema del circuito eléctrico que se decide utilizar.

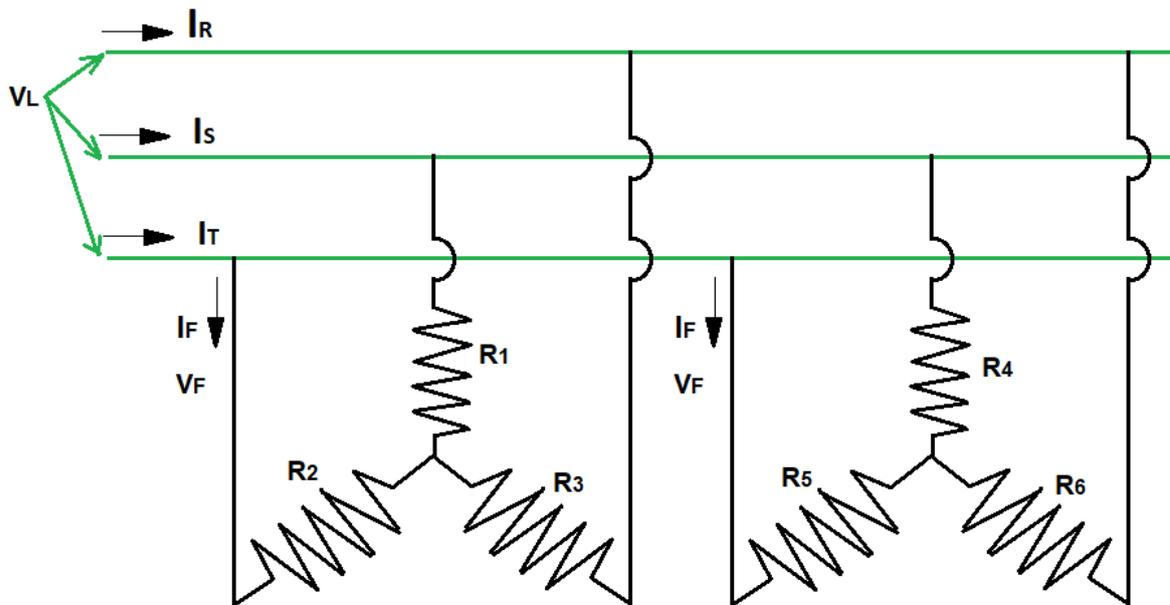


Figura 24. Esquema del circuito eléctrico trifásico en estrella del horno

Los resultados del dimensionamiento de las resistencias eléctricas se muestran en la tabla 9. A partir de estos resultados se evalúa si es posible distribuir las resistencias, con dimensiones dadas en la tabla 1, en la superficie de las paredes laterales del horno; en este caso el análisis demuestra que sí es posible y mediante el esquema de la figura 25 se muestra cómo quedaría esta distribución en una de las paredes. En principio se tendrán 8 hileras por cada una de las tres resistencias conectadas en estrella.

Tabla 9. Resultados del dimensionamiento de las resistencias eléctricas del horno tomado como ejemplo

Parámetros calculados	Resultado	Ecuación empleada	Observaciones
Área de las paredes laterales del horno (A_p)	1,86 m ²	-	L*H Tabla 7
Temperatura de las resistencias eléctricas (T_c)	1100 °C	-	$T_H + 100$
Material de la resistencia	78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20)	-	Anexo 9
Potencia específica superficial ideal (W_i)	35 063 W/m ²	27	$C_o = 5,67 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ϵ_c y $\epsilon_H \approx 0,8$
Potencia nominal del horno por unidad de superficie entre flujo ideal, coeficiente (ϕ)	0,76	28	$P_{nom} = 50\ 000 \text{ W}$
Forma y colocación de las resistencias	Circular en espiras dentro de ranuras	Tabla 5	-
Coeficiente (α)	0,31	Tabla 6	-
Potencia específica superficial real (W_{real})	10870 W/m ²	29	-
Tensión de fase (V_F)	254 V	30	-
Corriente de línea (I_L)	66 A	31	-
Corriente para cada resistencia (I_{R1})	33 A	38	-
Potencia de cada resistencia (P_{R1})	8333 W	37	-
Resistividad eléctrica (ρ)	1,08 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	-	anexo 9 $C_t = 1,076$
Diámetro de la resistencia eléctrica (d)	3,6 mm	33	
Longitud de la resistencia eléctrica (l)	68 m	35	
Diámetro de las espiras (D)	18 mm		5*d
Paso de las espiras (s)	7 mm		2*d
Número de las espiras (N)	1494		

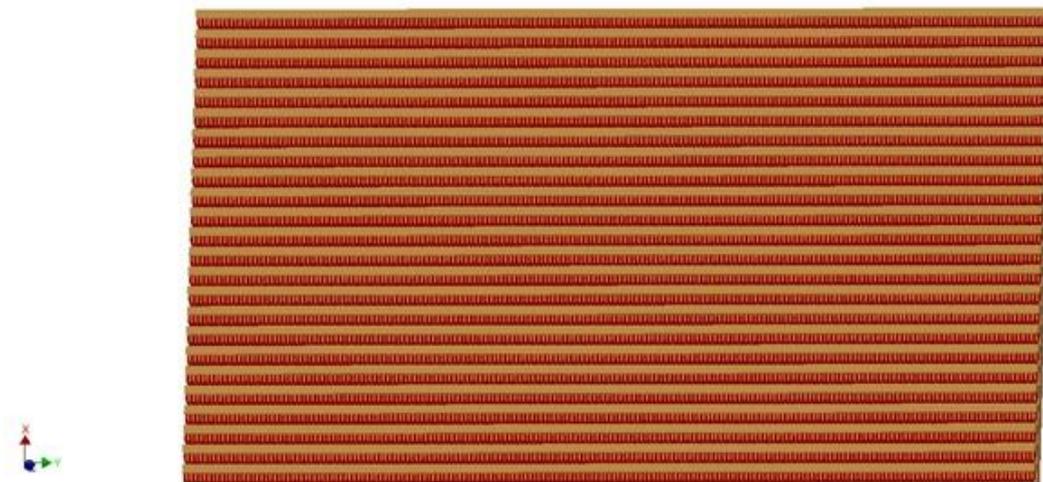


Figura 25. Esquema representativo de la distribución de las resistencias en una de las paredes del horno.

CONCLUSIONES

1. La información necesaria para llevar a cabo el dimensionamiento de hornos de tratamiento térmico de aceros se encuentra dispersa en la literatura, por lo que se hace necesario trabajar en la unificación de la misma. Se destaca que una parte importante de dicha información se encontró en idioma ruso.
2. Los aspectos principales a tener en consideración para la selección de un horno versátil para tratamiento térmico de aceros son: dimensiones de la cámara, balance de energía y dimensiones de las resistencias eléctricas.
3. A partir de la productividad horaria y la productividad por unidad de superficie, se pueden determinar las dimensiones de la cámara y efectuar el balance de energía de un horno de tratamiento térmico de aceros.
4. A partir de las recomendaciones descritas en el presente trabajo y la herramienta de cálculo computacional desarrollada se obtuvieron resultados, del dimensionamiento de un horno de cámara eléctrico para tratamiento térmico de aceros, coherentes con los reportados en la literatura.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAI, T., BAKER, G. M. & BATES, C. E. 1991. *Heat Treating ASM Metals Handbook*, America.
- ARIAN, C. 2016. *Termocuplas*. Retrieved junio 9, 2016, from *Tipos de termocuplas*: <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf> [Online]. Available: <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf> [Accessed abril 2019].
- ASTIGARRAGA, J. 1998. *Hornos industriales de resistencias eléctricas*, España, McGraw Hill.
- AVNER, S. H. 1992. *Introducción a la Metalurgia Física*, Mexico.
- BARREIRO, J. A. 1984. *Tratamientos Térmicos de los Aceros*, España, Madrid, Nuevas Gráficas, S. A. - Rodríguez San Pedro.
- BAUTERMIC 2014. <http://www.bautermic.com/productos/hornos-electricos-HE>.
- BOREL 2018. *Standard Furnaces & Ovens Products Catalogue*. Switzerland.
- BOYLESTAD, R. L. 2014. *Introducción al análisis de circuitos*. 10a edición. Méjico: Pearson Educación de Méjico.
- CARTER, B. 2010. *Ceramics materials: Science and Engineering*. M.Grant. Lorton.P.139-153.
- CENGEL, Y. 2004. *Transferencia de calor*, México, Editorial McGraw Hill. Segunda edición.
- ÇENGEL, Y. & GHAJAR, A. 2011. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. Cuarta edición. Mc Graw Hill. Pp. 995.
- COREALLA, B. & VELASCO, F. 2016. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CALENTADO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS QUE TRABAJE EN UN RANGO DE TEMPERATURAS ENTRE 1000 A 1350 GRADOS CENTÍGRADOS, Y CONTROLADO POR UN SISTEMA COMPUTARIZADO* Available at: <https://es.scribd.com/doc/238780164/pdf> [Accessed febrero 2019].
- CREUS, A. 1997. *Instrumentación industrial*, España, Barcelona, Marcombo, S.A.
- CHAPMAN, A. J. 2001. *Fundamentals of Heat Transfer*, United States of America, Editorial Macmillan Publishing Company.
- ECUADOR 2013. *Resistencias eléctricas*. Recuperado de: <http://www.ecuadoronline.co/industria-de-resistencias-electro---termicas-24046.html>.
- ESTÉVEZ, J. 1988. *Hornos de resistencias*. Available at: <https://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Lección11.HornosResistencia.RESI STENCAS. CALENTAMIENTO.pdf> [Accessed febrero 2019].
- GIRALDO, A. V. 2009. *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*. Universidad de Antioquia.
- HIRE, T. 2019. *THERMAL HIRE LTD In House Heat Treatment* [Online]. Available: <http://www.thermalhire.com/in-house-heat-treatment.asp> [Accessed abril 2019].
- HOLTMAN, J. P. 1998. *Transferencia de calor*, España, Editorial McGraw – Hill / Interamericana de S. A. U. Octava Edición.
- INCROPERA, F. 1999. *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Mexico, Editorial Pearson.

- IOFFE 1981. Soboleva Impresos ИОФФЕ, Х. & ДР, И. 1981. Нагрев металла. Металлургия 280с..
- IPAC, С. 2017. Catalogue Ipac. Planchas de láminas de acero ASTM A36. www.ipaccatalogues.com.
- ISO/WD13579-1 2009. Industrial furnaces and associated thermal processing equipment. Energy balance and efficiency. Part 1: General methodology.
- KOWALIK, W. & JAROSŁAW, B. 2015. Examination of thermal work of electric chamber furnace to thermal processing. *Advances in Science and Technology Research Journal* Volume 9, No. 27, Sept. 2015, pages 11–16. DOI: 10.12913/22998624/59078.
- KREITH, F. 2001. *Principios de Transferencia de Calor*, México, Editorial Thomson Learning, Sexta edición.
- LOGACHEV 2010. Soboleva, Impresos. Логачёв М, Иваниский Н, Давидович, Л. Расчеты электрических печей. Минск. 131 с. .
- METALSHANDBOOK 2010. ASM Metals handbook. Properties and selection nonferrous alloys and special purpose materials. 2.
- MILLS, A. 2015. *Transferencia de calor*, Colombia, Editorial McGraw – Hill / Irwin.
- NABERTHERM 2018. Hornos Industriales. German, Bremen: GmbH . 28865 Lilienthal.
- PARRA, M. 2008. Tip. Literaria de F. Mata, ed. Estática de las bóvedas: resumen de las lecciones orales dadas en el año de 1860 en la Academia Nacional de San Carlos, hoy Escuela de Bellas Artes (primera edición). Madrid. .
- PÉREZ, L. R. 2008. *Tratamientos Térmicos Protocolo*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
- PÉREZ, M. & CINTRA, J. 1985. *Teoría y tecnología del tratamiento térmico*, editorial Félix Varela, Cuba. .
- PLANA, M. 1991. *Tratamiento Térmico de los Metales*, Espana, Barcelona, Marcombos S.A.
- QUEEN, D. K. 1986. *Procesos de transferencia de calor*, México, Editorial Continental. S.A, Edición Décimo Novena.
- ROSE, M. 2008. «Photonics Spectra, » October 2008. [En línea]. Available: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=35225&PID=5&VID=22&IID=158>. [Último acceso: 18 octubre 2016]. .
- RUÍZ, R. 2007. *Tratamientos Térmicos*, Espana Quito.
- SNOL 2018. Thermal processing equipment for industries.
- SOKOLOV 1988. Chico Empreso. Соколов К.Н. Технология термической обработки и проектирование термических цехов: учеб. для вузов / К.Н. Соколов, И.К. Коротич. – М.: Металлургия, 1988. – 384 с.
- TELEGUIN, A. & AVDEVA, V. 1985. *Теплотехника у нагrevatelnie ustroistva*. Mashinostroenie, 248p. (en ruso. impreso).
- TELEGUIN, A. & LEBEDIEV, N. 1975. *Constructsi y raschot naгrevatelniv ustroistv*. Mashinostroenie, 280p. (en ruso. impreso).
- TERMOPARES 2003. Termopares, Disponible: <http://www.termopares/tipos/caracteristicas.html> [Consulta: 2003, octubre].
- TORRES, E. 2004.). Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros. Available at:

- <http://monografias.umcc.cu/monos/2004/QuiMec/um04QM02.pdf> [Accessed febrero 2019].
- TRINKS, W. 1971. *Hornos Industriales*, Espana, Tercera Edición.
- URUCA. 2016. *REFRACTARIOS LA URUCA* [Online]. Available: <http://www.refractarioslauruca.com/refrhornoscalderas.htm>.
- ЗОБНИН, Б. & ДР, И. 1982. Теплотехнические расчёты металлургических печей *Металлургия* 359 ст
- ИОФФЕ, Х. & ДР, И. 1981. Нагрев металла. *Металлургия* 280с. .
- КАРАМЫШЕВА, Е. & МКЛАКОВА, П. 2009. Тепловой баланс печи. ЛГТУ. Рр-17.
- КУЗЬМЕНКО, В. И. & ТИХОМИРОВ 2008. Методические указания самостоятельной работы и практических занятий по курсу “Технология нагрева и нагревательных устройств КШЦ” по образовательной программе подготовки бакалавра. МУ-ХПИ-МТ. ОМД23.12.2007. Составили В.И. Кузьменко, Тихомиров Ю.С. – Харьков: НТУ“ХПИ”, 2008. (en ruso, ministerstbvo obraz.pdf).
- СОБОЛЕВ, Б. М., МАНСУРОВ СОБОЛЕВ, Ю. Н. & ХЕЙН ВИН ЗО, С. Б. 2015. Марьин Расчёты плавильных и нагревательных печей: учеб. пособие Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО. «КнАГТУ», 2015. – 131 с. ISBN 978-5-7765-1178-3.
- СОБОЛЕВА 2015. Соболева Расчёты плавильных и нагревательных печей. Комсомольск на Амуре. 132 ст. .
- СОКОЛОВ, К. 1984. Оборудование термических цехов Виша Школа. р.328.
- ТЫЧАКА, В. & ГУСОВКОГО, В. 1983. Расчет нагреватльных и термических печей *Металлургия* 480 ст.

ANEXO

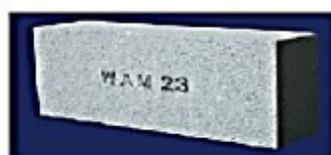
Anexo 1. Planchas de aceros disponibles en el mercado metalúrgico.

Plancha laminada en caliente				Plancha laminado en frio			
Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Peso Aprox. (kg)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Peso Aprox. (kg)
1,220	2,440	1,50	35,05	1,000	2,000	0,70	10,99
1,220	2,440	2,00	46,74	1,000	2,000	0,90	14,13
1,220	2,440	3,00	70,10	1,000	2,000	1,10	17,27
1,220	2,440	4,00	93,47	1,000	2,000	1,40	21,96
1,220	2,440	5,00	116,84	1,220	2,440	0,40	9,35
1,220	2,440	6,00	140,21	1,220	2,440	0,45	10,52
1,220	2,440	8,00	186,94	1,220	2,440	0,50	11,68
1,220	2,440	9,00	210,31	1,220	2,440	0,60	14,02
1,220	2,440	10,00	233,68	1,220	2,440	0,70	16,36
1,220	2,440	12,00	280,41	1,220	2,440	0,75	17,53
				1,220	2,440	0,90	21,03
				1,220	2,440	1,10	25,70
				1,220	2,440	1,40	25,70
				1,220	2,440	2,00	32,72

Anexo 2. Propiedades de los ladrillos de arcilla.

LADRILLO REFRACTARIO			
PRODUCTO	Ladrillo de arcilla refractaria		
CLASIFICACIÓN	Sílice Aluminosa (ácido)		
APLICACIÓN	En paredes y bóvedas de hornos cerámicos, cámara de combustión, incineradores, calderas, hornos de recalentamiento, recocido, tratamiento térmico, hornos para calcinación de minerales, hornos para tina de galvanizado, etc.		
CARACTERÍSTICAS	Buena resistencia al choque térmico, resistente a la abrasión e impacto.		
ANÁLISIS QUÍMICO	COMPONENTES	FORMULA	% PESO
	Sílice	SiO ₂	63.1
	Alúmina	Al ₂ O ₃	33.5
	Óxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	02.0
	Magnesita	MgO	00.1
	Cal	CaO	00.6
	Álcalis	Na ₂ O + K ₂ O	00.7
PROPIEDADES FÍSICAS	Refractariedad	28 C.P.E	
	Temperatura de servicio	1400°C	
	Densidad	2.0 – 2.1 gr/cc	
	Resistencia a la compresión	240 Kg/cm ²	
RENDIMIENTO	Depende del formato del ladrillo. El ladrillo Recto en posición de cabeza 138 unidades / m ² , en soga, 69 unidades / m ² , de canto 38 unidades / m ²		
PRESENTACION	Formatos: Recto, Recto Partido, Dividido, Arco 1, Arco 2, Arco 3, Bisel de Canto, Cuña 1X, Cuña 1, Cuña 2, Cuello, Arranque 60°, Planchas, Bloques, Piezas especiales.		

Quality Insulation Bricks (WAM-23)



Characteristic: Long Time Materials
Type: Heat-Resistant Material
Trademark: WAM
Origin: China
Product Description

Insulating bricks characteristics and advantages:

1. Insulating bricks has Lower content of iron, alkaline and impurities, good high temperature properties.
2. Insulating bricks has Homogeneous structure, light weight, energy saving because lower heat storage in the furnace during cooling cycles.
3. Insulating bricks has High strength, good thermal shock resistance under high temperature.
4. Insulating bricks has Precise sizes due to grinding and shaping after firing, which meets the requirement of construction.

Physical and Chemical Properties of Insulating brick								
Index /brand		WAM-20	WAM-23	WAM-25	WAM-26	WAM-28	WAM-30	WAM-32
Classification temperature °C		1230	1260	1350	1430	1540	1650	1760
F		2246	2300	2462	2606	2804	3002	3200
Bulk density kg/m ³		520	580	800	800	890	1030	1250
Ib/ft ³		32	36	50	50	55.5	64	78
Modulus of rupture MPa		0.7	0.9	1.4	1.5	1.6	1.7	2
Ib/in ²		102	131	203	218	232	247	290
Cold crushing strength MPa		1.2	1.2	2.0	2.0	2.6	2.8	3.4
Ib/in ²		174	174	363	348	377	406	493
Permanent Liner Change %		-0.1	-0.1	-0.5	-0.5	-0.8	-0.9	-0.9
°C x hour		1230X24	1230X24	1350X24	1400x24	1510x24	1620x24	1730x24
Thermal conductivity (W/m. k)	400 °C	0.17	0.17	0.24	0.24	0.30	0.40	0.49
	600 °C	0.19	0.19	0.28	0.27	0.32	0.42	0.50
	800 °C	0.22	0.22	0.32	0.30	0.35	0.44	0.51
	1000 °C	0.24	0.25	0.37	0.32	0.38	0.45	0.53
	1200 °C	--	--	--	0.35	0.39	0.47	0.55
Al ₂ O ₃ %		45	45	45	55	65	72	76
Fe ₂ O ₃ %		0.7	0.7	0.65	0.6	0.3	0.3	0.3
SiO ₂ %		50	50	50	42	33	26	22
TiO ₂ %		1.3	1.2	1.3	1.1	0.9	0.5	0.3
CaO+ MgO %		0.5	0.7	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2
K ₂ O+ Na ₂ O %		1.0	1.3	1.1	1.1	0.8	0.2	0.1

The above data are subject to normal manufacturing variations and change without notice. Results should not be used for specification purpose.

Anexo 3. Características principales de las aleaciones Ni-Cr.

Aleación Ni-Cr	78,5 - 20	68,5 - 30	60 - 16	35 - 20
Ni %	80	70	60	37
Cr %	20	30	15	18
Fe %	<1	<1	20	40
Densidad Kg/m ³	8 300	8 100	8 200	7 900
Temp. de fusión °C	1 400	1 380	1 390	1 390
Temp. máx. de trabajo °C	1 150	1 200	1 000	925
Calor específico kJ/Kg.K	0,45	0,45	0,45	0,46
Conductividad térmica W/m.K	15	14	13	13
Dilatación lineal 20-1000 °C/°C ⁻¹	18	18	17	19
Resistencia a la rotura 20°C N/mm ²	700	800	700	700
900°C N/mm ²	100	100	100	120

Anexo 4. Características principales de las aleaciones Fe-Cr-Al.

Aleación Fe-Cr-Al	72,5 Fe	73 Fe	83 Fe
Cr %	22	22	14
Al %	5,3	4,8	4
Fe %	72	73	80
Densidad Kg/m ³	7 150	7 250	7 300
Temp. de fusión °C	1 500	1 500	1 500
Temp. máx. de trabajo °C	1 375	1 280	1 050
Calor específico kJ/Kg.K	0,46	0,46	0,48
Conductividad térmica W/m.K	13	13	15
Dilatación lineal 20-1000 °C/°C ⁻¹	15	15	15
Resistencia a la rotura 20°C N/mm ²	800	800	700
900°C N/mm ²	8	6	4

Anexo 5. Algunos tipos de termopares.

Tipo	Denominación	Composición (%)	Temp. (°C)	Diámetro (mm)	F.E.M en (mV)
B	Platino – Rodio 30% vs Platino – Rodio 6%	Pt Rh 30% - Pt Rh 6%	0 – 1 500	0,35 – 0,5	0 – 10,094
R	Platino – Rodio 13% vs Platino	Pt Rh 13% - Pt	0 – 1 400	0,35 – 0,5	0 – 16,035
K	Niquel – Cromo vs Niquel (chromel vs alumel)	Cu Ni – Ni	0 – 1 000 0 – 900	(3 o 2) 1,38	0 – 41,269 0 – 37,325

Anexo 6. Catálogo de hornos industriales de cámara del fabricante BOREL.

Catálogo de hornos de industriales de cámara del fabricante BOREL (Suiza)							
Modelo	Volumen (L)	Temperatura (°C)	Dimensiones internas			Potencia (kW)	Volumen (m ³)
			ancho (mm)	alto (mm)	profundidad (mm)		
FI 1250-53	52,5	1250	350	300	500	12	0,053
FI 1250-63	63	1250	350	300	600	14	0,063
FI 1250-120	120	1250	500	400	600	21	0,120
FI 1250-160	160	1250	500	400	800	24	0,160
FI 1250-200	200	1250	500	400	1000	30	0,200
FI 1250-280	280	1250	700	500	800	33	0,280
FI 1250-350	350	1250	700	500	1000	33	0,350
FI 1250-420	420	1250	700	500	1200	37	0,420
FI 1250-490	490	1250	700	700	1000	40	0,490
FI 1250-640	640	1250	800	800	1000	52	0,640

Anexo 7. Catálogo de hornos de cámara del fabricante NABERTHERM.

Catálogo de hornos de cámara del fabricante NABERTHERM									
Modelo	T _{máx} (°C)	Dimensiones interiores en (mm)			Volumen (l)	Potencia (kW)	Conexión eléctrica*	Peso (kg)	Volumen (m ³)
		ancho.	profundidad	alto					
N 7/H	1280	250	250	140	9	3	monofásica	60	0,009
N 11/H ¹	1280	250	350	140	11	3,5	monofásica	70	0,012
N 11/HR ¹	1280	250	350	140	11	5,5	trifásica ²	70	0,012
N 31/H	1280	350	350	250	30	15	trifásica	210	0,031
N 41/H	1280	350	500	250	40	15	trifásica	260	0,044
N 81	1200	500	750	250	80	20	trifásica	820	0,094
N 161	1200	550	750	400	160	30	trifásica	910	0,165
N 321	1200	750	1100	400	320	47	trifásica	1300	0,330
N 81/13	1300	500	750	250	80	22	trifásica	900	0,094
N 161/13	1300	550	750	400	160	35	trifásica	1000	0,165

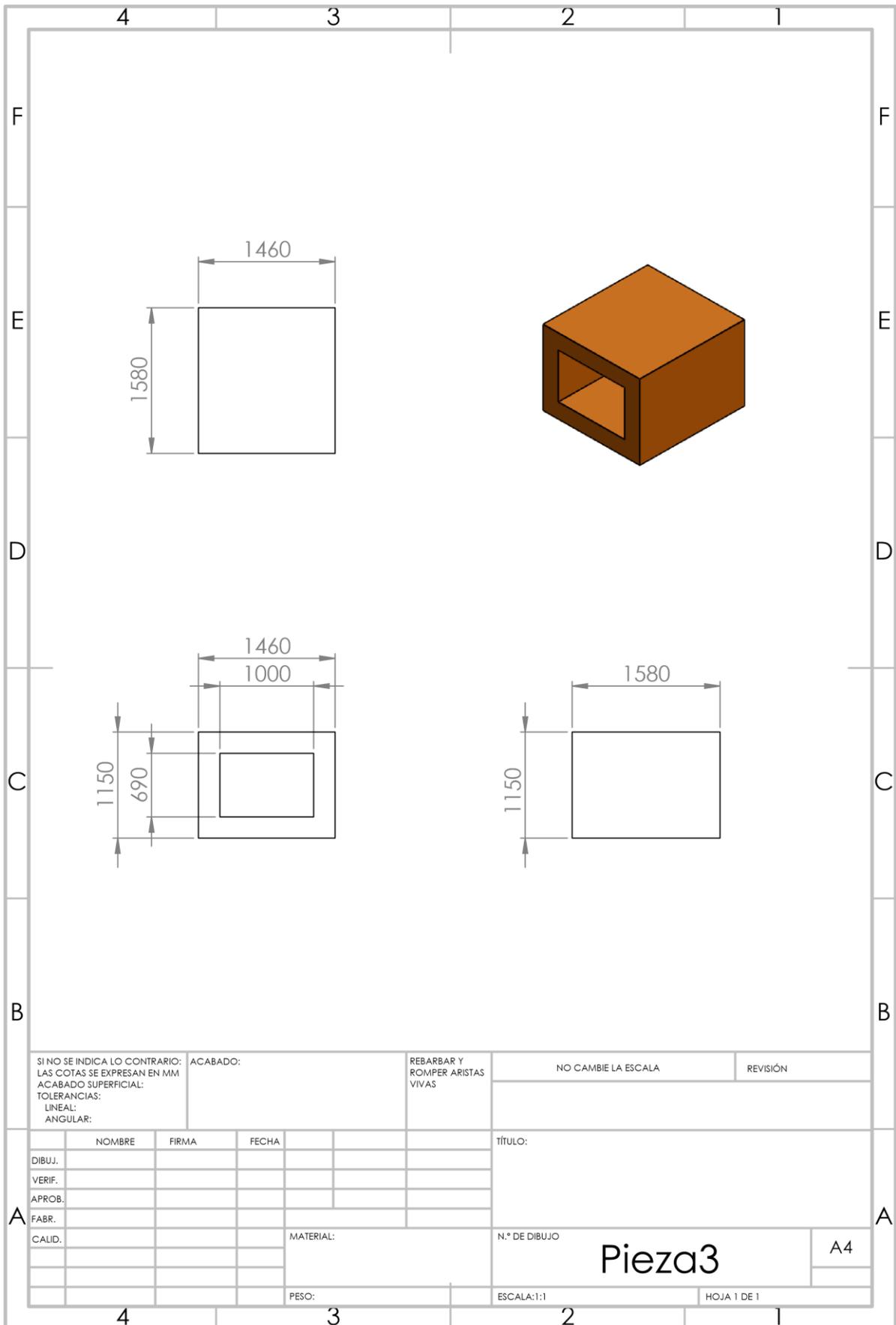
Anexo 8. Catálogo de hornos de cámara del fabricante SNOL [3].

Catálogo de hornos de cámara del fabricante SNOL								
Modelo	T _{max} (°C)	Cámara interna (mm)			Potencia (kW)	Voltaje (V)	Peso (kg)	Volumen (m ³)
		Ancho (b)	Profundidad (l)	Alto (h)				
1100 °C								
SNOL 70/1100	1100	510	550	350	15	400	480	0,098
1200 °C								
SNOL 56/1200	1200	470	430	380	10	400	340	0,077
SNOL 98/1200	1200	460	700	350	21	400	980	0,113
SNOL 120/1200	1200	630	930	300	20	400	705	0,176
SNOL 165/1200	1200	560	850	360	25	400	830	0,171
SNOL 185/1200	1200	500	830	500	37	400	600	0,208
SNOL 250/1200	1200	510	1000	530	31	400	600	0,270
SNOL 288/1200	1200	620	1200	420	31	400	1150	0,312
SNOL 360/1200	1200	620	1200	500	36	400	1150	0,372
SNOL 430/1200	1200	620	1200	600	36	400	1150	0,446

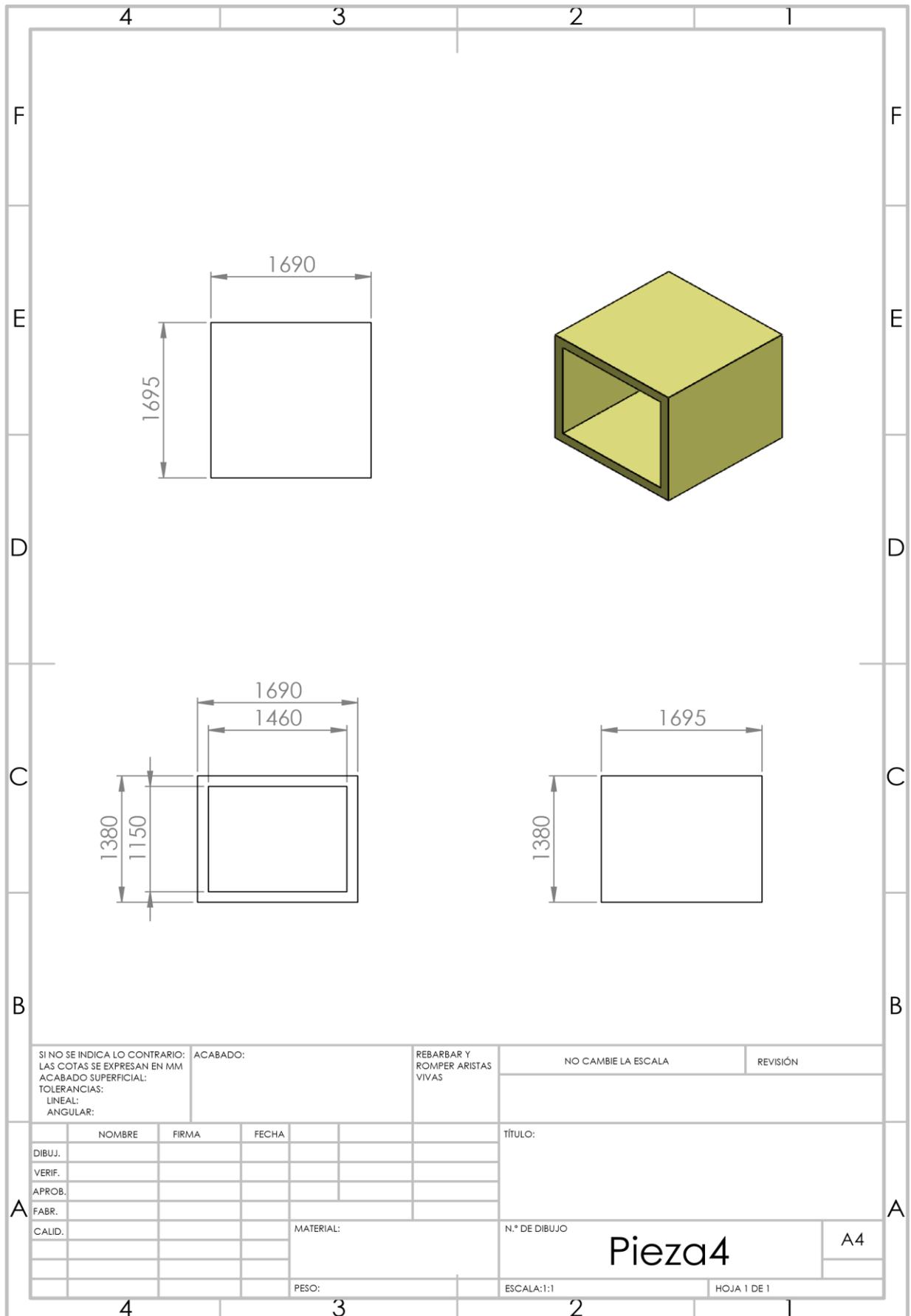
Anexo 9. Materiales empleados en como resistencias eléctricas de hornos de tratamiento térmico

Aleación	Temperatura (°C)	Resistividad 20 °C (Ω· mm ² /m)	Resistividad, %, del 20 °C			
			250°C	550°C	820°C	1100°C
78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20)	1150	1,08	4,5	7	6,3	7,6
68,5Ni-30Cr-1,5Si (70-30)	1200	1,18	2,1	4,8	7,6	9,8
68Ni-20Cr-8,5Fe-2Si	1150	1,165	3,9	6,7	6	7,1
60Ni-16Cr-22Fe-1,5Si	1000	1,12	3,6	6,5	7,6	10,2
35Ni-20Cr-43Fe-1,5Si	925	1	8	15,4	20,6	23,5
83,5Fe-13Cr-3,25Al	1050	1,25	3	9,7	16,5	20,3
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1280	1,35	0,3	2,9	4,3	4,9
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1375	1,45	0,2	1	2,8	4

Anexo 10. Croquis del revestimiento refractario del horno propuesto



Anexo 11. Croquis del revestimiento aislante del horno propuesto



4 3 2 1

F

F

E

E

D

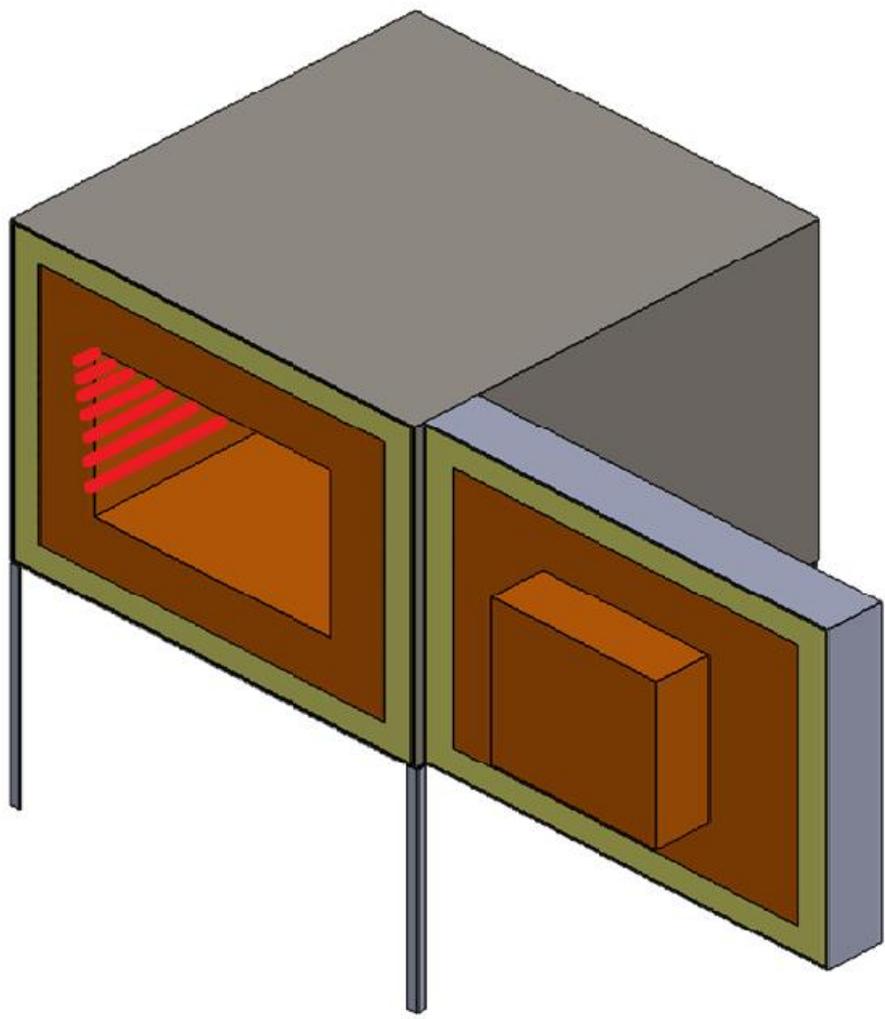
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			FIRMA	TÍTULO: Horno de resistencias eléctricas	
FECHA			MATERIAL:		
DIBUJ.			N.º DE DIBUJO		
VERIF.			78		
APROB.			A4		
FABR.			ESCALA:1:1		
CALID.			HOJA 1 DE 1		
PESO:					

A

A

4 3 2 1