

“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA REHABILITACIÓN DE UN HORNO  
DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS”

BOLÍVAR DAVID HIDALGO PONCE

# TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO



Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Riobamba – Ecuador

2008

~~Facultad de Mecánica~~

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** BOLÍVAR DAVID HIDALGO PONCE

**TÍTULO DE LA TESIS:** “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA REHABILITACIÓN DE UN HORNO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS”

**Fecha de Examinación:** Octubre 22 de 2008.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. WASHINGTON ZABALA M.			
ING. RAMIRO VALENZUELA.			
ING. IVÁN CANTOS.			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:**

---

---

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO	Página
<b>I. GENERALIDADES</b>	
1.1. Introducción ... ..	1
1.2. Antecedentes generales ... ..	3
1.3. Justificación ... ..	5
1.4. Objetivos ... ..	7
1.4.1. Objetivo general ... ..	7
1.4.2. Objetivos específicos ... ..	7
<b>II. ANÁLISIS DEL ESTUDIO TRADICIONAL DEL HORNO</b>	
2.1. Tratamientos térmicos ... ..	8
2.1.1. Revenido ... ..	9
2.2. Tipos de hornos ... ..	13
2.2.1. Clasificación de los hornos para tratamientos térmicos ... ..	17
2.2.1.1. Hornos de solera móvil ... ..	22
2.3. Análisis y descripción del funcionamiento de los hornos eléctricos .	24
2.4. Eficiencia ... ..	28
2.5. Condiciones térmicas ... ..	30

### III. ESTUDIO TÉRMICO DEL HORNO

3.1.Toma y análisis de la información ... ..	36
3.2.Datos preliminares ... ..	36
3.2.1.1.Material ... ..	38
3.2.1.2.Conductividad térmica ... ..	44
3.2.1.3.Especificaciones ... ..	44
3.2.1.4.Sistema de transporte de los elementos hacia el interior del horno ... ..	48
3.2.1.5.Construcción ... ..	49
3.2.1.6.Sistema de calefacción ... ..	51
3.3.Análisis técnico del horno ... ..	53
3.4.Diagnóstico del estado actual del horno ... ..	53
3.5.Principales problemas existentes en el horno ... ..	55
3.6.Alternativas de optimización ... ..	56
3.6.1. Paneles laterales ... ..	58
3.6.2. Aislantes ... ..	60
3.6.3. Tipo de paneles ... ..	66
3.6.4. Recubrimiento y techos ... ..	70
3.6.5. Estructura y tipo actual ... ..	75

### IV. REDISEÑO DEL HORNO

4.1. Parámetros de funcionamiento ... ..	77
4.2. Parámetros de temperatura ... ..	78
4.3. Selección de los parámetros de diseño ... ..	85
4.4. Rediseño térmico ... ..	87
4.5. Rediseño mecánico ... ..	128
4.6. Selección de materiales ... ..	131
4.7. Mantenimiento del horno ... ..	136

## V. ANÁLISIS DE COSTOS

5.1. Costos de materiales y construcción ... ..	141
5.2. Costo de operación ... ..	146

## CONCLUSIONES

## RECOMENDACIONES

## Referencias bibliográficas

## Bibliografía

## ANEXOS



## **S U M A R I O**

Se ha realizado un Estudio de Factibilidad para la Rehabilitación de un Horno de Tratamientos Térmicos para la empresa Hidroagoyán S. A, con la finalidad de rediseñar el sistema de calentamiento de dicho horno para de este modo realizar el tratamiento térmico de revenido a los álabes móviles de las turbinas Francis además de efectuar un precalentamiento de los mismos antes de someterlos a reparación por soldadura.

Con un diagnóstico y rediseño de algunos componentes del actual equipo se determinó que la alternativa más adecuada es la del calentamiento a través de calefactores de fibra cerámica, para cumplir con los ciclos térmicos recomendados por el proveedor del material de los álabes, es decir alcanzar en 14 horas la temperatura máxima de 700 °C, mantenerla durante 7 horas y enfriar hasta la temperatura ambiente en 14 horas más.

Así también se precisó la necesidad de aislamiento térmico con lana de vidrio que permita un considerable ahorro energético en este proceso, y provea una temperatura exterior segura para los operadores del taller.

Con la implementación de éste rediseño se estableció una potencia necesaria de 30 Kw con un rendimiento de 69,41% para el horno.

## **C A P Í T U L O I**

### **G E N E R A L I D A D E S**

## 1.1. Introducción

Algunos materiales metálicos, y de manera especial, el acero requieren mejorar sus propiedades físicas, iniciales, luego del proceso original de fusión. Es entonces que en función de las aplicaciones respectivas a las que se destine el material, se precisa un tratamiento adecuado para lograr dichas prestaciones del material.

Este es el propósito de los Tratamientos Térmicos, que son una serie de calentamientos y enfriamientos, en tiempos variables para cada aplicación, que producen en el material, el cambio de sus propiedades originales a las requeridas.

La operación, con el propósito de conseguir modificaciones en sus prestaciones, a la que este estudio se refiere se realiza en hornos destinados a tratamientos térmicos. Dichos hornos proveen calor a la carga, elevando su temperatura sin que se presente alguna reacción química o cambio de estado como fusión o vaporización.

Los álabes de las turbinas hidráulicas empleadas en la generación eléctrica, están sometidas al desgaste producido por el permanente contacto y choque del agua que impulsa su rotación, este es el caso específico de los álabes de la turbina Francis, ubicada en la central hidroeléctrica de HIDROAGUYÁN.

Es así que se pretende mejorar las propiedades de este elemento importante de la cadena de generación eléctrica, el mismo que como se mencionó anteriormente se ve enfrentado a serios problemas de desgaste, que son reducidos a través de rellenos de soldadura y otros procesos.



Aquí se hace más evidente el propósito de este trabajo, que proyecta proveer de una nueva alternativa al horno para tratamientos térmicos con el que cuenta actualmente HIDROAGOYAN.

En el transcurso de este trabajo se elaborará un diagnóstico del horno en cuestión, que se complementará con una propuesta para la optimización del mismo.

Será preciso entonces revisar el recubrimiento y el aislamiento con el que cuenta actualmente el horno, además de verificar la eficiencia que provee la fuente de calor.

Para tal efecto se buscarán algunos elementos que ayuden a este propósito en la revisión de los distintos tipos de hornos para tratamientos térmicos que se utilizan en la industria actualmente. Dando especial atención a los hornos eléctricos y a su funcionamiento.

Para realizar un rediseño térmico del horno será necesario repasar brevemente algunas teorías de la Transferencia de Calor como la convección, conducción y la radiación, que permitan seleccionar la fuente de calor más conveniente para la obtención de las temperaturas que se requieren en los tiempos especificados, además de los materiales refractarios necesarios.

Se dará una especial atención al tratamiento térmico de Revenido, pues este ciclo es el requerido para obtener las propiedades deseadas en los álabes de la turbina Francis.

Así mismo se realizará un análisis de costos que permita visualizar la factibilidad económica que implicaría realizar los cambios que se sugieren en el horno para su optimización.

## **1.2. Antecedentes generales**

La instalación para generación Hidroeléctrica de Hidroagoyán, cuenta con dos grupos Francis, de una potencia unitaria máxima de 78 MW, con una caída neta de 149 m. La central está integrada con el Sistema Nacional Interconectado.

El Aprovechamiento está situado a 180 Km. al sureste de Quito y usa las aguas muy cargadas del río Pastaza. El Agua está tomada en un reservorio diario y restituída al río unos 3 Km. aguas debajo de la presa.

La Central es subterránea. A la que se ha suministrado dos turbinas de eje vertical, rodete de propulsión simple tipo Francis, con carcasa espiral, álabes fijos, álabes móviles, y un tubo de succión tipo codo. La turbina está conectada a un generador vertical suministrado por Mitsubishi Electrical Corp.

La velocidad de generación es de  $n = 225$  rpm.

El horno con que cuenta Hidroagoyán se proyectó para realizar un tratamiento para la eliminación del hidrógeno de los álabes móviles de la turbina Francis, producto del ambiente húmedo al que están sometidos, los mismos que luego serán sometidos a

un proceso de relleno y soldadura para reparar averías, producto del desgaste al que se encuentran sujetos estos elementos de generación eléctrica.

La temperatura recomendada por el fabricante de los álabes, para esta operación es de 600 °C sin embargo, actualmente sólo se alcanza una temperatura máxima de 90 °C, con un precalentamiento de un día.

Los álabes móviles de la turbina Francis están sometidos a desgaste y erosión, producto del contacto directo de éstos elementos mecánicos con la impulsión hidráulica del proceso de generación eléctrica.

Este desgaste del material puede ser reparado a través de un relleno de las zonas afectadas con una soldadura adecuada, sin embargo, esto provoca una acumulación de tensiones internas en el álabe, que pueden ocasionar daños aún mayores en este elemento si no se hace nada por aliviarlas. De ahí la importancia de abordar también algunas generalidades sobre los tratamientos térmicos que favorezcan la eliminación de éstas tensiones, puesto que es para tal efecto que se diseñará el horno en cuestión.

A través de los tratamientos térmicos se pueden modificar las propiedades de los metales, mediante alteraciones de su estructura, pudiendo así desempeñar con garantías los trabajos demandados.

El tratamiento térmico consiste en calentar el acero a una temperatura determinada, mantenerlo a esa temperatura durante un cierto tiempo hasta que se forme la estructura deseada y luego enfriarlo a la velocidad conveniente. Los factores temperatura-tiempo

deben ser muy bien estudiados dependiendo del material, tamaño y forma de la pieza. Con el tratamiento se consigue modificar microscópicamente la estructura interna de los metales, produciéndose transformaciones de tipo físico, cambios de composición y propiedades permitiendo conseguir los siguientes objetivos:

- Estructura de mejor dureza y maquinabilidad.
- Eliminar tensiones internas y evitar deformaciones después del mecanizado.
- Estructura más homogénea.
- Máxima dureza y resistencia posible.
- Variar algunas de las propiedades físicas.

La ASTM, SAE, y ASM, en forma sustancialmente idéntica, definen Tratamientos térmicos como:

*“Operación o combinación de operaciones que comprende el calentamiento y enfriamiento de un metal o de una aleación en el estado sólido, con el fin de obtener ciertas condiciones o propiedades convenientes.”<sup>1</sup>*

### **1.3. Justificación**

HIDROAGOYAN es una empresa cuyos servicios satisfacen un porcentaje de la demanda de energía eléctrica del mercado nacional. Por tal motivo es de interés de la Central Eléctrica HIDROAGOYAN adoptar un estudio que garantice su servicio eficiente.

---

<sup>1</sup> AVALLONE & BAUMEISTER. Manual del Ingeniero Mecánico. México: Ed. M c Graw Hill, 2001

HIDROAGOYAN presenta la necesidad de un proyecto en el que se diseñe y optimice un sistema de calentamiento para un horno pequeño para tratamientos térmicos de los álabes móviles de la turbina Francis, los mismos que puedan realizarse en el interior de su planta. De esta forma se mejorarían las propiedades físicas de estos elementos de generación eléctrica, lo que a su vez asegurará un bajo costo en el mantenimiento de los mismos, y una sustancial prolongación de la vida útil de los álabes, lo que implica un ahorro significativo de la empresa al maximizar el aprovechamiento de sus recursos.

Por otro lado es importante el impulso a la generación de tecnología propia, esto se traduce en disminución de costos por importación de equipos, a la vez que se apoya a la investigación en el país, en un campo que puede abrir las puertas a un incremento de la optimización del consumo energético a través de un diseño adecuado con un alto rendimiento. Dado que en la actualidad el tema de la eficiencia energética es el centro de discusiones a favor de la conservación del medio ambiente.

La ingeniería tiene como una de sus primeras premisas el continuo mejoramiento de las soluciones que se presentan a las necesidades específicas de las personas y de la industria, es entonces la Universidad la llamada a facilitar las herramientas requeridas para el progreso del país y de sus empresas.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Rehabilitar el Sistema de calentamiento de un horno para tratamientos térmicos para los álabes de la turbina Francis.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Utilizar la teoría existente para rehabilitar el sistema de calentamiento de un horno que cumpla con todas las necesidades que requiere un tratamiento térmico.
- Revisar el diseño actual del horno
- Analizar alternativas para el rediseño
- Determinar la carga térmica del horno
- Evaluar la propuesta de diseño

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DEL ESTUDIO TRADICIONAL DEL HORNO**

## 2.1 Tratamientos térmicos

Son ciclos de calentamiento y enfriamiento a los cuales se somete un material con el fin de variar su dureza y cambiar su resistencia mecánica.

Es a través de este proceso aplicado a los metales que mediante la acción del calor en tiempos determinados se consigue un cambio en su estructura y de sus propiedades físicas en las deseadas, controlando la estructura cristalina.

Los mismos que pueden definirse en términos generales como:

**Normalizado:** es uno de los tratamientos más conocidos, que se usa para afinar y homogeneizar la estructura.

**Recocido:** busca "ablandar" el acero para facilitar el mecanizado posterior de la pieza.

**Temple:** consiste en un calentamiento seguido de un enfriamiento. Con este tratamiento se consigue aumentar la dureza y la resistencia mecánica del acero.

**Revenido:** es un tratamiento complementario y similar al temple, del que se diferencia en la velocidad de enfriamiento. Mediante el revenido se consigue cierta tenacidad para evitar posteriores deformaciones.

Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

Avbner, señala que *“todos los procesos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de*

*estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.”*

Estas operaciones de calentamientos y enfriamientos sucesivos, implican un amplio rango de temperaturas que deben considerarse en forma específica para cada material que se someta a dicho proceso.

La operación de revenido se realiza en la industria por varias razones entre ellas, se pueden enumerar las siguientes:

- Para eliminar tensiones luego del proceso de reparación por soldadura
- Para crear una pieza forjada más homogénea en su estructura.
- Para obtener el máximo provecho de las cualidades del acero.
- Finalmente, el revenido se usa a menudo porque las propiedades mecánicas, deseadas en utilización, pueden conseguirse por este procedimiento, de manera que el revenido constituye el tratamiento térmico final.

#### **2.1.1. Revenido**

A breves rasgos el revenido consta de los siguientes componentes:

- Calentamiento hasta una temperatura determinada pero inferior a  $A_{c1}$ .



- Uno o varios mantenimientos a una o varias temperaturas determinadas.
- Uno o varios enfriamientos hasta la temperatura ambiente (generalmente al aire, agua o aceite).

El revenido es un tratamiento térmico que sigue al de templado del acero. Tiene como fin reducir las tensiones internas de la pieza originadas por alguna afectación térmica o por deformación en frío. Mejora las características mecánicas reduciendo la fragilidad, disminuyendo ligeramente la dureza.

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Consiguiendo así que la martensita se transforme en una estructura más estable, terminando con un enfriamiento rápido, dependiendo del tipo de material.

La temperatura y el tiempo de calentamiento son los factores que más influyen en el resultado del revenido. Una vez terminado el revenido se dejan enfriar las piezas en atmósfera calma obteniéndose unas superficies totalmente blancas, pudiendo utilizarse o montarse inmediatamente, en caso de no requerir operaciones posteriores, como por ejemplo pulidos o piezas de máxima precisión.

La formación de martensita da lugar a considerables tensiones en el acero. Por lo cual, los álabes, después de la soldadura son sometidos a un revenido, que es un proceso que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la temperatura crítica. El

objetivo del revenido es, eliminar las tensiones internas del material y aumentar la tenacidad y ductilidad del acero, aún cuando este aumento de ductilidad se logre normalmente a costa de una disminución de la dureza y de la resistencia.

#### **O b j e t i v o s d e l r e v e n i d o**

**M o d i f i c a l a s p r o p i e d a d e s m e c á n i c a s:** el acero que ha sido templado es muy resistente pero tiene poca ductilidad y tenacidad, pero si se vuelve a calentar a temperaturas comprendidas entre la temperatura ambiente y 700 °C, y luego se enfría al aire, la dureza y la resistencia a la tracción disminuyen a medida que se eleva la temperatura del revenido y al mismo tiempo aumenta la ductilidad y la tenacidad.

**M o d i f i c a l a s p r o p i e d a d e s f í s i c a s:** los aceros por efecto de las transformaciones que experimentan en el revenido, en general se contraen pero también se dilatan.

**M o d i f i c a l a s p r o p i e d a d e s q u í m i c a s:** Estas modificaciones se deben a cambios de microestructuras que se descomponen de la martensita que se obtiene en el temple y que se transforma en otros constituyentes más estables.

En consecuencia, se debe efectuar el revenido inmediatamente seguido a la operación de reparación de la erosión con soldadura.

La velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25 mm de espesor o diámetro).

El efecto del revenido depende, de la aleación del acero, del temple, del espesor de la pieza y del tratamiento aplicado.

## **Fases del revenido**

El revenido se hace en tres fases:

1. Calentamiento a una temperatura inferior a la crítica.
2. Mantenimiento de la temperatura, para igualarla en toda la pieza.
3. Enfriamiento, a velocidad variable, no es relevante pero tampoco debe de ser excesivamente rápido.

## **Calentamiento**

El calentamiento se puede hacer en hornos de sales o eléctricos. Para los aceros al carbono de construcción, la temperatura de revenido está comprendida entre 450 a 600°C, mientras que para los aceros de herramientas la temperatura de revenido es de 200 a 350°C. En esta fase la martensita, a la que se llega con el temple expulsa el exceso de carbono.

## **Mantenimiento de la temperatura**

La duración del revenido a baja temperatura es mayor que a las temperaturas más elevadas, para dar tiempo a que sea homogénea la temperatura en toda la pieza.

## **Enfriamiento**

La velocidad de enfriamiento del revenido no tiene influencia alguna sobre el material tratado cuando las temperaturas alcanzadas no sobrepasan las que determinan la zona de fragilidad del material; en este caso se enfrían las piezas directamente en agua. Si el revenido se efectúa a temperaturas superiores a las de fragilidad, es conveniente enfriarlas en baño de aceite caliente a unos 150°C y después al agua, o simplemente al

aire libre. El tiempo y la temperatura son dos de los parámetros más críticos del revenido

## **2.2. Tipos de hornos**

### **Hornos industriales**

Entendemos por hornos industriales los equipos o dispositivos utilizados en la industria en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente.

El calentamiento puede servir para diferentes aplicaciones, como:

- Fundir.
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos.

Para evitar ambigüedades, se denominará en este documento hornos a todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte del proceso, a temperatura superior a la ambiente, realizándose el calentamiento sobre las piezas de forma directa (inducción, resistencia propia, etc.) o de forma indirecta por transmisión de calor de otros elementos (tubos radiantes, humos de combustión, resistencias eléctricas, etc.)

En cuanto a la clasificación de los hornos, se puede hacer atendiendo a diferentes aspectos:

- Forma de funcionamiento (continuo o discontinuo).
- Tipo de calefacción utilizado (quemadores de combustible, energía eléctrica, u otras).
- Disposición de la calefacción (superior, inferior, etc.).
- Tipo de efecto en el producto (fusión, recalentamiento, etc.).
- Tipo de recinto (solera, carro, crisol, etc.).
- Forma de recuperación del calor de gases.

A lo largo de esta investigación se va a profundizar, desde el punto de vista energético, en el funcionamiento y características del tipo de horno empleado en la Industria Siderúrgica, para la ejecución de tratamientos térmicos.

Tal como se mencionó en la introducción de este trabajo, la referencia específica será a los hornos industriales u hornos de calentamiento de metales, en los que se transfiere calor a la carga de tal forma que su temperatura se eleve sin lograr ninguna reacción química o cambio de estado, concretamente; sin que llegue a producirse fusión o vaporización de la carga.

Por ello es necesario recalcar la importancia que tiene el manejo adecuado de la temperatura en los hornos para tratamientos térmicos, puesto que es sabido que las temperaturas elevadas ablandan a la mayoría de materiales metálicos, facilitando así las futuras operaciones de deformación por flexión, forja, extrusión, estampación, o laminación.

Si la temperatura se eleva, aún más se elimina la acritud y el metal puede llegar a fundirse. El proceso de calentamiento y posterior enfriamiento, cuidando que no se produzca ninguna deformación es conocido con el nombre de recocido.

Por encima de cierto punto crítico, la elevación de la temperatura del metal, seguida de un enfriamiento brusco, nos va a dar como resultado un acero más duro y resistente, pero con una ductilidad menor.

Un nuevo calentamiento a una temperatura inferior al punto crítico disminuye la dureza y aumenta la ductilidad.

Entonces los hornos industriales pueden distinguirse dentro de una primera clasificación<sup>2</sup>:

- Según la finalidad por la cual se calienta el material
- Según la naturaleza de la transferencia de calor al material
- Según el manejo del material en el interior del horno.

Según la finalidad del calentamiento puede distinguirse el propósito básicamente metalúrgico del horno, ya sea para revenido, recocido, carburizado, cianurización, cementación, forjado, esmaltado o algún otro fin.

Según la transferencia de calor pueden distinguirse:

---

<sup>2</sup> A VALLONE & BAUMEISTER. Manual del Ingeniero Mecánico. México: Ed. McGraw Hill, 2001

- Hornos tipo estufa, en los que el calor se transfiere a los productos de la combustión del combustible en contacto directo con el material calentado.
- Hornos de mufla, en los que el calor es conducido a través de una mufla de metal o refractario, la cual protege al material que está siendo calentado.
- Hornos de baño líquido, en los que se transfiere el calor al material sumergido en un medio líquido de calentamiento.

Mientras que según el manejo del material puede distinguirse del tipo discontinuo si el material que se cargó en el horno permanece en su posición hasta que es extraído, luego de haber sido calentado lo suficiente. O puede ser continuo si el material se desplaza a través del horno gracias a medios mecánicos.

Para realizar tratamientos térmicos se emplean diversos tipos de hornos, los mismos que se diferencian entre sí básicamente por las siguientes características, que dependerán del tratamiento térmico específico a realizarse:

- Su forma
- Su tamaño
- Su sistema de calentamiento.

Es preciso considerar algunas características que deben poseer los hornos destinados a tratamientos térmicos:

- La regulación de la temperatura debe ser lo más exacta posible.
- La temperatura en el interior debe ser uniforme, no deben admitirse diferencias mayores a los 20 °C
- Debe tener suficiente inercia calorífica, de manera que no se produzca una baja en la temperatura al introducir piezas frías en un horno caliente, y si ésta baja, su la pueda recuperar fácilmente.<sup>3</sup>

En la industria el horno de combustión es más utilizado que el horno eléctrico, aunque para muchas aplicaciones éste último sea la elección más acertada, más allá de la relación de costos del combustible.

### **2.2.1 Clasificación de los hornos para tratamientos térmicos**

#### **Hornos de recalentamiento**

El término hornos de recalentamiento se aplica en este documento a aquellos en los que se imparte el calor a la carga para elevar la temperatura de ésta, sin pretender que se produzca ninguna reacción química o cambio de estado, tal como fusión o vaporización.

En el trabajo de los metales, la temperatura desempeña un papel de gran importancia.

Por ejemplo:

---

<sup>3</sup> G A V I D I A – C A B A Y Diseño y construcción de un horno de doble cámara para tratamientos térmicos



- Las temperaturas elevadas vuelven más blandos la mayoría de los metales, capacitándolos para las operaciones de deformación por flexión, forja, estampación, extrusión o laminación.
- Las temperaturas todavía más elevadas eliminan la acritud de los mismos.

Se pueden distinguir los diferentes procesos de calentamiento de los metales por el objetivo que los mismos persiguen. De este modo se pueden diferenciar entre otros las siguientes finalidades de tales procesos:

- El proceso de calentamiento, enfriando después de modo que no se produzca ninguna deformación, se conoce como recocido.
- La elevación de la temperatura por encima de un cierto punto crítico, seguida de un enfriamiento brusco, vuelve el acero más duro y resistente, pero con una ductilidad menor.
- El calentamiento lento, seguido de un enfriamiento igualmente a baja velocidad, pretende eliminar tensiones y se conoce como revenido.
- También se calientan los metales para absorber carbono, como en el caso de la cementación.

El calentamiento de los metales, cualquiera que sea su objeto, se realiza en hornos, que se denominan comúnmente hornos de calentamiento o de recalentamiento, hornos de recocido y hornos de tratamiento térmico.

En este documento estamos considerando los hornos de recalentamiento, que tienen como objeto fundamental el calentamiento de piezas para procesos de tratamiento térmico.

Se mantiene entonces el estado sólido de las piezas durante todo el período de calentamiento y manteniéndolo a la temperatura determinada, y se pretende simplemente alcanzar transformaciones en la microestructura del material con el propósito de alterar sus propiedades físicas iniciales y a través de este proceso de calentamiento y enfriamiento el material pueda aliviar las posibles tensiones internas.

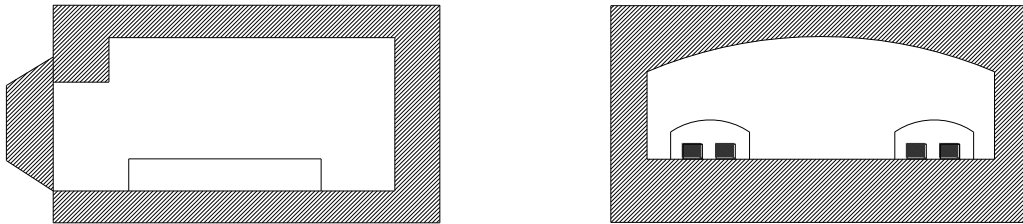
Las subdivisiones del tratamiento térmico son muy numerosas e importantes también, puesto que a más de modificar sus propiedades físicas, se pueden calentar los metales para modificar sus propiedades químicas, como es el caso de la cementación, en el que el acero es calentado para absorber carbono.

Las temperaturas para las operaciones industriales que conciernen a este trabajo, dependen del material que se va a calentar, de la finalidad del proceso de calentamiento y de las operaciones que se efectúen a continuación. En cualquier proceso de calentamiento, la temperatura del horno supera siempre aquella a la que ha de calentarse la carga.

Se puede clasificar a los hornos de tratamientos térmicos por la manipulación del material en el proceso mismo de calentamiento dentro del horno. Es así que se pueden distinguir dos tipos básicos de hornos según esta premisa:

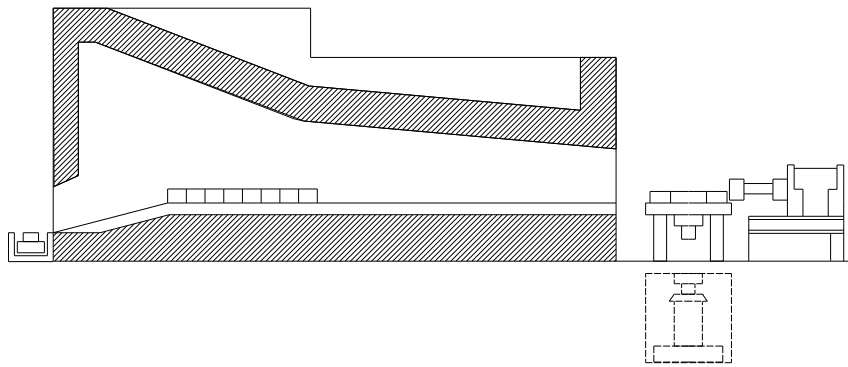
- a) El horno "Dentro - Fuera". En este tipo de horno la carga se realiza por lotes intermitentes o periódicos.
- b) El horno continuo.

Una de las principales características del horno "Dentro - Fuera" es la temperatura constante en su interior. Su principio básico es colocar en el horno la pieza en la posición especificada hasta que la carga alcance la temperatura requerida. Una vez que el proceso de calentamiento se ha completado, la carga es retirada por la misma puerta por donde fue introducida en el horno.



**Figura 1. Horno del tipo "Dentro Fuera"**

En tanto que en los **hornos continuos**, el material que se está calentando está siendo a la vez desplazado por el interior del horno. La carga puede pasar sobre una solera fija o también la solera puede ser dotada de movimiento.



**Figura 2. Horno continuo con descarga por un extremo**

En algunas aplicaciones se requiere una atmósfera especial que proteja a las piezas y se evite la oxidación o la descarburación; entonces los hornos se diseñan con una envolvente exterior hermética al gas. El calor es suministrado por tubos radiantes que queman combustible o por resistencias eléctricas que actúan como elementos calefactores.

#### **Hornos eléctricos.**

Los hornos alimentados con energía eléctrica son de un uso muy extendido por su comodidad y fácil manejo. En la actualidad con los sistemas de programación que se incorporan son muy útiles y fiables.

En las cámaras de estos hornos van alojadas, en unos surcos o vías de las paredes, unas espirales de hilo conductor de energía eléctrica, que actúan de resistencia formadas por aleaciones de cromo-níquel y de otros metales cuya característica es la buena conductibilidad según las temperaturas que se quieran alcanzar.

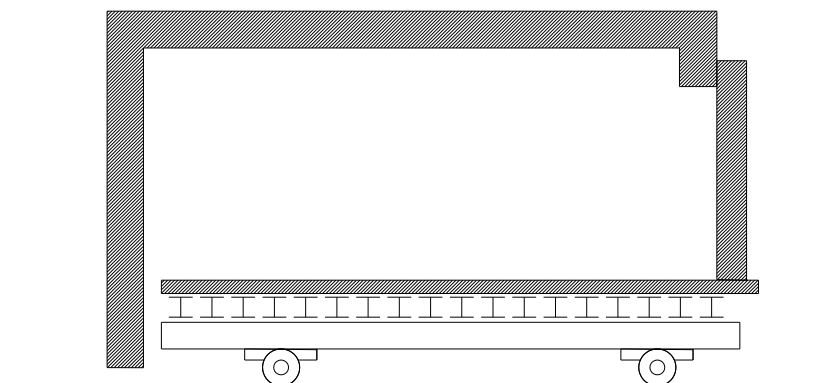
Hay que tener en cuenta que un Kilovatio hora desarrolla, aproximadamente, 850 Cal/kg. Aunque parezca que el uso de esta energía eléctrica resulta cara, si contamos todas las ventajas que puede proporcionarnos, todos estos inconvenientes se ven reducidos e incluso pueden resultar ventajosos.

#### 2.2.1.1 Hornos de solera móvil

Conocido también como horno de carretón.

En este tipo de horno, la solera móvil es cargada con el material fuera del horno para luego ser introducida a través de carriles. El carretón permanece detenido durante el tiempo de calentamiento y, en algunas ocasiones durante el enfriamiento también. Una vez terminado el ciclo térmico deseado, la carga se vuelve a extraer del horno a través de los carriles.

Este horno es empleado para calentar materiales pesados o voluminosos. Como puede verse es claramente la elección más apropiada para realizar el tratamiento térmico de los álabes de las turbinas Francis debido al gran tamaño y peso que éstas representan.



### Figura 3. Horno de solera móvil.

Según el movimiento de la carga los hornos pueden clasificarse en periódicos o continuos. En los del tipo periódico o intermitente, la carga no se mueve durante el calentamiento, básicamente este tipo de horno tiene su aplicación en tratamientos térmicos para piezas muy grandes, como es el caso específico de esta aplicación, el álabe móvil de la turbina Francis.

Sin embargo es necesario señalar las diferencias que este tipo de horno presenta en relación con los hornos continuos a fin de enmarcar esta investigación.

En los hornos continuos la carga está en movimiento constantemente, ésta entra al horno por un punto y sale por otro. Este movimiento de la carga puede realizarse a través de un mecanismo empujador, sobre un transportador, en vagonetas, por gravedad, por el movimiento de la solera o en una corriente fluída.

- Los empujadores o los transportadores se usan en los hornos para calentar tochos
- Las vagonetas se usan en los hornos de túnel.
- La gravedad se aprovecha en los hornos verticales y en los rotativos.
- Las soleras anulares rotativas se emplean en los tratamientos térmicos
- En los hornos de varios pisos, la carga se mueve en cada uno alternativamente hacia el fondo o hacia el frente, impulsada por rastrillos, y va pasando por gravedad de un piso al siguiente

En esta aplicación específica se trata de un horno periódico, ya que la carga se introduce en el horno sólo cuando se realizará el calentamiento necesario, siendo su funcionamiento intermitente, únicamente cuando se requiera ejecutar el respectivo tratamiento térmico.

Por ser los elementos a calentarse voluminosos y pesados se montarán en una vagoneta adecuada para soportar dos álabes en cada carga y como el conjunto pesará más de una tonelada, el sistema para arrastrar la carga hacia el interior del horno utilizará un tecla y un sistema de poleas.

### **2.3 Análisis y descripción del funcionamiento de los hornos eléctricos**

La conversión de energía eléctrica en calor es el principio para el funcionamiento de un amplio conjunto de hornos industriales destinados a tratamientos térmicos.

En los hornos y estufas de resistencias el calor se desarrolla por el paso de una corriente eléctrica a través de resistencias que funcionan como unidades de calentamiento, montadas de tal forma que se mantienen fuera de contacto con la carga.

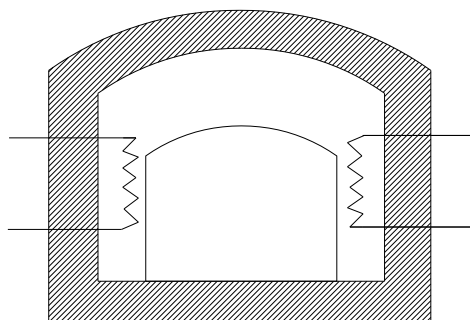
Se genera calor a partir de electricidad a través de:

- Arcos eléctricos,
- Corrientes inducidas en resistencias,
- Corrientes inducidas directamente en la carga

En la actualidad los hornos que emplean resistencias eléctricas se encuentran más difundidos en el ámbito industrial, sin embargo, la inducción se emplea en algunas aplicaciones específicas.

Son varios los materiales empleados en la elaboración de las resistencias eléctricas destinadas a calefacción:

- La mayoría se construyen de una aleación de Níquel – Cromo
- Vidrio fundido
- Carbón granular
- Carbón sólido
- Carburo de Silicio
- Grafito
- A veces se puede emplear el material a calentar como resistencia.



**Figura 4. Horno eléctrico con resistencias metálicas**

En un horno de resistencias eléctricas la transferencia de calor se produce por radiación, convección y/o conducción.



El Principio básico de funcionamiento es el paso de corriente eléctrica a través de una resistencia que se calentará por este efecto.

La figura muestra un horno con resistencias eléctricas laterales, pero cabe aclarar que este tipo de hornos también pueden presentar resistencias colocadas en la parte posterior, parte inferior o parte superior.

Los hornos eléctricos aparecieron primero tímidamente en la industria y se van imponiendo actualmente en sustitución de los demás, sobre todo en países con escasa disponibilidad de combustibles.

Las características del calor generado eléctricamente son:

- Mayor precisión en el control del calor y su distribución
- Se pueden emplear con facilidad distintas atmósferas protectoras para el proceso
- La temperatura máxima es limitada únicamente por la naturaleza del material de carga.

El menor gasto de instalación, la menor superficie ocupada, la limpieza, una conducción y regulación fácil y automática, son los factores de ventaja en los hornos eléctricos.

El costo de la caloría eléctrica es sin embargo, muy superior al de la caloría procedente de combustibles, no obstante en la aplicación concreta de este estudio, la generación de calor a través de energía eléctrica no es un problema, por su plena disponibilidad

Es necesario repasar brevemente en esta sección, los flujos de calor que intervienen en este sistema:

Donde:

$Q_p$  = Calor perdido por conducción a través de las paredes del horno

$Q_u$  = Calor utilizado, que es el calor necesario para llevar a la temperatura que el tratamiento término exige al material que se está manejando.

Entonces la potencia teóricamente necesaria vendría dada por:

$$P = \frac{Q_u}{\eta * t}$$

Dónde:

$P$  = Potencia del horno

$Q_u$  = Calor utilizado

$\eta$  = Rendimiento

$t$  = Tiempo.

Es evidente que en la práctica, la potencia a suministrar al horno debería ser superior, tanto por las pérdidas eléctricas y térmicas que puedan apreciarse en el cálculo, como por la disminución de potencia debida al envejecimiento de las resistencias. Normalmente se aumenta en un 20 - 30 % .

#### 2.4 Eficiencia

En este punto se pueden señalar algunas ventajas y desventajas del horno de resistencias eléctricas, por ser la aplicación específica de este trabajo.

Entre las ventajas podemos enumerar:

- Limpieza y un ambiente seco durante el proceso de calentamiento
- Al no emplearse combustibles, no existe el riesgo de contaminación del material de la carga
- Se puede aprovechar toda la energía eléctrica útil y aplicarla en forma uniforme.
- No existen residuos nocivos del proceso
- El costo de construcción es bajo en comparación con opciones similares que generen calor a través de combustión
- Facilidad en la construcción y en el mantenimiento
- No ocupan mucho espacio
- Existe un efectivo control de la temperatura interior
- **El rendimiento energético es elevado en el orden de 0.6 a 0.8**
- Funcionamiento sencillo
- El ciclo térmico puede desarrollarse lentamente, de esta forma se pueden producir todas las transformaciones internas del metal que se desean con el tratamiento térmico
- Control preciso de la temperatura
- Reservas de carga suficientes para un rápido equilibrio térmico tras el cargamento

- Control preciso del tiempo
- Transferencia térmica uniforme
- Gran capacidad de carga
- Ahorro de espacio y energía

En tanto que se pueden señalar como desventajas:

- La energía eléctrica resulta ser costosa
- Las resistencias eléctricas son vulnerables a algunos tipos de escorias
- Resultan antieconómicos cuando se requiere calentar grandes cantidades de material (toneladas)<sup>4</sup>

## 2.5 Condiciones térmicas

La temperatura es un factor muy importante en los procesos metalúrgicos, debido a que muchas de sus propiedades se ven seriamente afectadas por la mayor o menor incidencia de esta variable.

Así por ejemplo la microestructura del material tenderá a sufrir alteraciones conforme exista una variación de la exposición a temperaturas precisas. Dichas alteraciones o

---

<sup>4</sup> G A V I D I A – C A B A Y Diseño y construcción de un horno de doble cámara para tratamientos térmicos

cam bios en la microestructura del material van a depender en gran medida de la com posición del mismo.

Este fenómeno físico se aprovecha para conferirle al material en cuestión otras propiedades distintas a las iniciales, ya sea para mejorar o reducir alguna de ellas. Sin embargo es importante observar que la temperatura a la que se someta a la carga no debe ser exagerada pues a más de ser un desperdicio de calor, se debe cuidar que no exista un cambio de fase. Por otro lado si la temperatura no es suficiente no se conseguirán los cambios físicos que se pretenden.

Tanto la velocidad de calentamiento, como la exactitud, la permanencia y el enfriamiento, tienen una gran influencia para conseguir unos resultados óptimos después del revenido

El proceso básico para endurecer el acero mediante tratamiento térmico consiste en calentar el metal hasta una temperatura a la que se forma austenita, generalmente entre los 750 y 850 °C, y después enfriarlo con rapidez sumergiéndolo en agua o aceite. Este tratamiento térmico de endurecimiento, como el temple, que forman martensita, crea grandes tensiones internas en el metal, que se eliminan mediante el revenido, que consiste en volver a calentar el acero hasta una temperatura menor. El revenido reduce la dureza y resistencia y aumenta la ductilidad y la tenacidad.

El objetivo fundamental del proceso de tratamiento térmico es controlar la cantidad, tamaño, forma y distribución de las partículas de cementita contenidas en la ferrita, que a su vez determinan las propiedades físicas del acero.

Hay muchas variaciones del proceso básico. El cambio de austenita a martensita se produce en la última fase del enfriamiento, y que la transformación se ve acompañada de un cambio de volumen que puede agrietar el metal si el enfriamiento es demasiado rápido.

### **Temperatura de revenido**

El revenido es un tratamiento térmico consistente en proporcionar un calentamiento a una pieza, después del temple, entre la temperatura ambiente y la de transformación A<sub>c1</sub> (aprox. 730 °C.), según el tipo de acero a tratar, efectuándose un mantenimiento, más o menos prolongado, a esta temperatura seguido de un enfriamiento adecuado.

Calentando por encima de 650 °C, se obtiene estructura de grano grueso, al bajar la temperatura de revenido, se van obteniendo estructuras cada vez más finas y más duras, en términos generales la temperatura de revenido varía entre 200 y 650 °C.

El calentamiento hasta la temperatura máxima se debe iniciar estando el horno a baja temperatura y de ser posible, a la temperatura ambiente; la elevación de temperatura debe ser uniforme en toda la pieza, esto se consigue elevando la temperatura del horno lo más lentamente posible.

De acuerdo a la norma ASTM A743, la recomendación para la gradiente de la temperatura vs. Tiempo hasta alcanzar la temperatura máxima de diseño de 700 °C debe ser de 50 °C por cada hora.

Entonces resulta que tomarían 14 horas hasta que el álabe alcance la temperatura de revenido.

### **Duración del revenido**

Para un acero dado, la permanencia a la temperatura del revenido depende de la forma y dimensiones de la pieza, en general, para los aceros con contenido medio de carbono se recomienda una hora por pulgada de espesor, más una hora

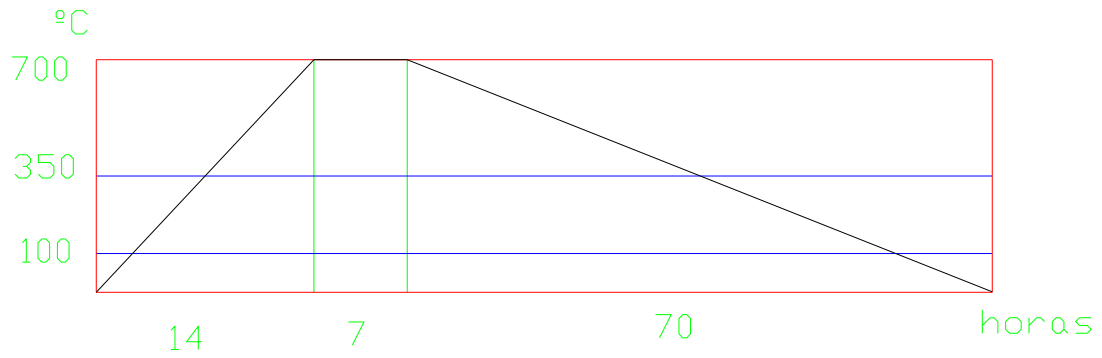
Esta recomendación es bastante cercana con la especificación del proveedor del material, puesto que:

$$e_{m\acute{a}x} = 8,7 \text{ pulg} = 222 \text{ m m}$$

Entonces se sugiere mantener la temperatura de revenido aproximadamente durante 8 horas y el proveedor recomienda un mantenimiento de 7 horas. Como se ve éstos valores son coherentes y cercanos.

La temperatura de calentamiento depende del contenido de carbono. En general esta temperatura la señala el proveedor y en el caso del material de los álabes móviles, el proveedor PACIFIC SPECIAL ALLOY CASTINGS CO. LTD. NAOTSU WORKS, señala que para alivio de tensiones debe calentarse el material hasta una temperatura mínima  $580 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 7 horas y luego proveer un enfriamiento al aire a razón de  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por hora

#### **Ciclo térmico del revenido**



**Figura 5. Ciclo térmico del revenido**

Para el análisis del comportamiento del álabe móvil sometido al ciclo térmico propuesto, se utiliza las herramientas de un software informático

Se procedió a modelar el problema de la distribución de la temperatura en todo el volumen de la sección del álabe que será objeto del alivio de tensiones en el horno.

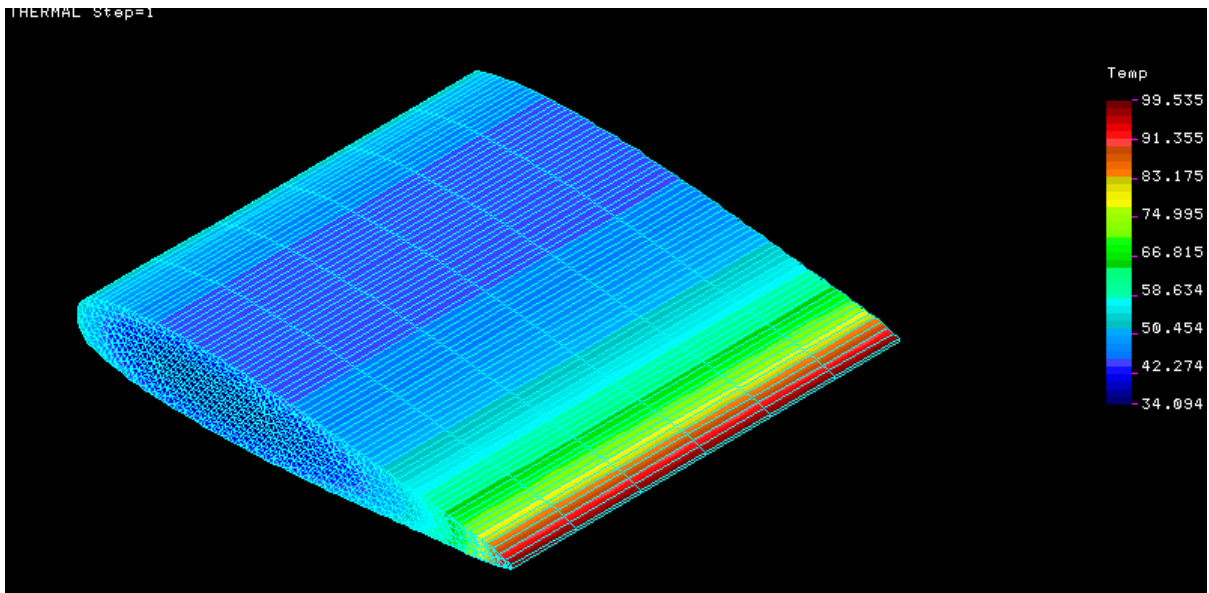
Es preciso señalar que la intervención de la soldadura aplicada, puede considerarse superficial, pues la erosión que será corregida no va más allá de 10 mm. en su grado más crítico, pues de superar este valor la reparación de soldadura deberá ser realizada en fábrica, con un control riguroso de precalentamiento y calentamiento posterior a la soldadura

Estos son los resultados que muestran la distribución de la temperatura en todo el volumen del álabe para el primer intervalo de tiempo que se asume es luego de 4,2 min.

**Tabla 1. Distribución de la temperatura luego de 4.5 minutos**



Nodo	Temperatura
1	52,226
371	35,372
741	52,772
1111	40,687
1481	37,767
1851	37,606
2221	36,658
2591	37,762
2961	43,993
3331	54,474
3701	89,997



**Figura 6. Distribución de la temperatura en el álabe luego de 4.5 minutos**

Para el intervalo 100 de tiempo que corresponde a 25 200 s (7 horas). Estos son los resultados que muestran la temperatura en todo el álabe.

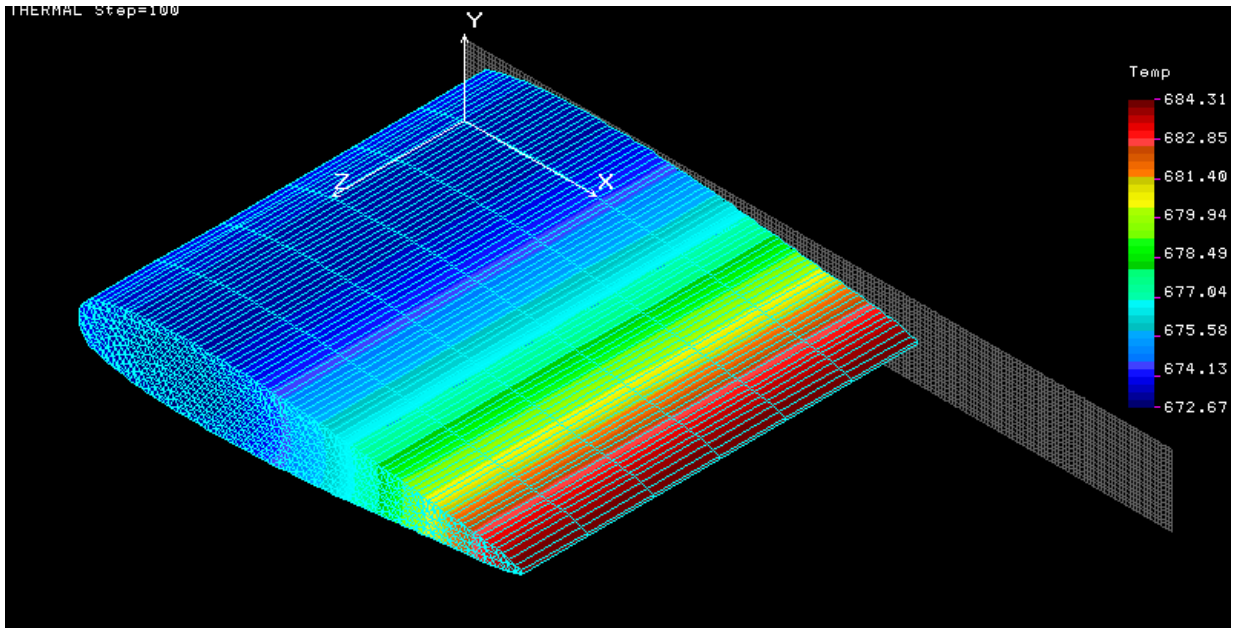


Figura 7. Distribución de la temperatura en el álabe luego de 7 horas

Tabla 2. Distribución de la temperatura luego de 7 horas

Nodo	Temperatura
1	673,74
371	673,78
741	673,77
1111	672,93
1481	672,96
1851	673,06
2221	673,85
2591	675,24
2961	677,3
3331	679,81
3701	683,97

Los resultados obtenidos en la modelación demuestran una distribución bastante uniforme de la temperatura en todo el volumen del álabe cuando es sometido a un ambiente convectivo de  $h_{\infty} = 2 \text{ Btu/h pie}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $1\ 292^{\circ}\text{F}$  ( $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y después de 7 horas ( $25\ 200 \text{ s}$ ).

## CAPÍTULO III

### ESTUDIO TÉRMICO DEL HORNO

#### 3.1. Toma y análisis de la información.

##### Información general sobre las turbinas:

- Número de álabes móviles ... .. 20 (para c/u)
- Diámetro circunferencial de los álabes móviles ... ..  $\Phi$  3920 mm
- Altura de los álabes móviles ... .. 560 mm
- Rodete ... .. Tipo Francis, eje vertical
- Dirección de Rotación ..... Sentido de las agujas del reloj  
(Visto desde el generador)
- Holgura entre álabes Móviles ... .. 0,24 ~ 0,53 mm
- Holgura entre la tapa superior y el anillo inferior ... .. 0,24 ~ 0,53 mm

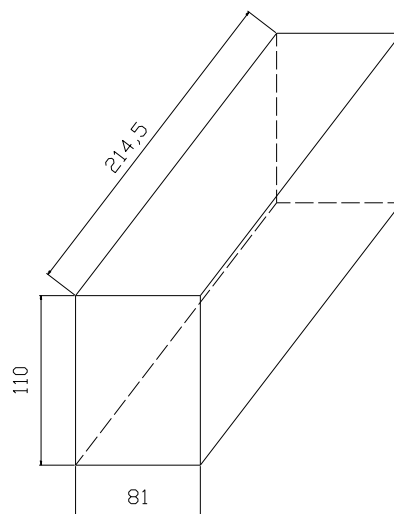
#### 3.2. Datos preliminares

En este caso, la producción horaria no es una premisa del diseño en vista de que se trata de rehabilitar los álabes móviles cuando sea necesario, por otro lado con el afán de optimizar los recursos de la empresa se decide mantener las dimensiones del horno que ya existe en el taller, en el que con la disposición adecuada de las piezas a tratarse se puede realizar el tratamiento térmico a dos álabes por cada carga.

La instalación convencional posee una zona de carga ampliamente dimensionada, sobre la cual se depositarán las piezas a tratar sobre la carreta transportadora, bien manual o automáticamente, a continuación se encuentran las zonas de calefacción y enfriamiento necesarias para obtener la producción deseada, seguidas opcionalmente de una zona de descarga.

Sin embargo en el horno que se está diseñando se utilizará para la carga y descarga la misma puerta con el propósito de reducir el espacio necesario.

Las dimensiones de la cámara interna del horno son:



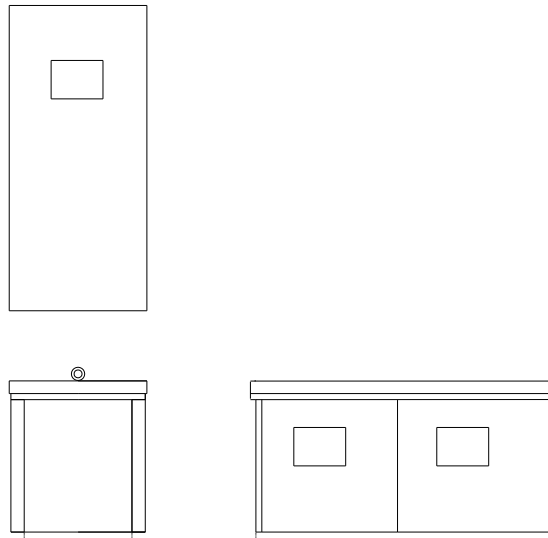
**Figura 8. Dimensiones de la cámara interna del horno**

En consecuencia el volumen de la cámara interna será de:

$$V = (0.81 \text{ m} \times 1.1 \text{ m} \times 2.145 \text{ m})$$

$$V = 1.911 \text{ m}^3 = 67.49 \text{ pie}^3$$

A continuación se presenta un esquema general de las vistas del horno:



**Figura 9. Esquema general de las vistas del horno**

### **3.2.1.1. Material.**

#### **Material Base**

El material base de los álabes móviles es de Acero inoxidable martensítico, cuyas designaciones son las siguientes:

**Tabla 3. Designaciones del material**

<b>ASTM</b>	743 Gr. CA -6NM
<b>UNS</b>	J91540, S4150
<b>TP</b>	903
<b>ANSI</b>	415

Para mayor información citaremos también sus designaciones en sistemas de estandarización ya obsoletos:

**Tabla 4. Designaciones obsoletas del material**

<b>EN 10088-3</b>	:1.4313 X3CrNiMo13-4
<b>ASTM - A</b>	:182-F6NM430F
<b>BS</b>	:425 C 11
<b>JIS</b>	:SCS5
<b>SEL</b>	:G-X5CrNi13-4
	:X4CrNi13-4
<b>UNS</b>	:J91540
<b>SIS</b>	:2384
<b>DIN</b>	:X4CrNi13-4
<b>NF</b>	:Z 6CN13-04

**Tabla 5. Composición química**

	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<b>Min</b>	-	11.50	3.5	0.4	-	-	-	-
<b>Máx</b>	0.06	14	4.5	1.0	1.0	1.0	0.040	0.030

**Tabla 6. Propiedades mecánicas.**

<b>Pruebas de tensión</b>				<b>Dureza</b>	<b>Impacto</b>
<b>Carga convencional</b>	<b>Resistencia tracción</b>	<b>Elongación</b>	<b>Reducción del área</b>	<b>Brinell</b>	<b>Charpy</b>
<b>Fluencia 0.2%</b>				<b>HBW</b>	
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>(10/3000)</b>	<b>J/cm<sup>2</sup></b>
<b>Min.</b>	<b>Min</b>	<b>Min.</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Min.</b>

550	750	15	35	285	60
-----	-----	----	----	-----	----

**Tabla 7. Tratamientos térmicos**

<b>Solubilización</b>	1025 ± 20 °C min	5 h.	Enfriamiento en el horno
<b>Enfriado</b>	980 ± 20 °C min	5 h.	Corriente de aire a presión
<b>Templado</b>	630 ± 20 °C min	7 h.	Enfriamiento al aire
<b>Alivio tensiones</b>	580 ± 20 °C min	7 h.	Enfriamiento al aire

**Tabla 8. Propiedades físicas.**

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Densidad	Kg/dm <sup>3</sup>	7.7
Resistividad eléctrica a 20 °C	Ω m m <sup>2</sup> /m	0.6
Magnético		si
Conductividad Térmica a 20 °C	W /m K	25
Calor Específico	J/K gK	430
Coeficiente de dilatación térmica media	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	
20 a 200 °C		10.9
20 a 300 °C		11.3
20 a 400 °C		11.6

#### **Material de soldadura**

Es muy importante también señalar la información que se recopiló acerca del material de aporte para la soldadura con el que se reparan los álabes móviles, la misma que se detalla a continuación:

El alambre empleado como material de aporte es un alambre aleado al Cr - Ni - Mo. Se trata de un alambre tubular FCAW de Acero martensítico con gas. OK Tubrod 410 NiMo.

El OK Tubrod 410 es un alambre tubular tipo "Flux Cored" que deposita metal de contenido 13Cr 4Ni de estructura martensítica.

Utilizado con protección gaseosa de Ar +25% CO<sub>2</sub> o 100% CO<sub>2</sub> presenta excelente característica de arco y excelente remoción de escoria, a donde puede ser utilizado con fuentes MIG convencionales o pulsadas.

Su gran ventaja es en comparación al proceso con alambre sólido (MIG), son la mejor penetración y mojabilidad del cordón con consecuente reducción de chisporroteos, disminución de defectos de fusión y del índice de retrabajo asociadas a elevadas tasas de depósito y gran productividad. Su estructura martensítica garantiza un excepcional desempeño contra el fenómeno de cavitación, siendo especialmente recomendado para aplicaciones de construcción, recuperación y mantenimiento de componentes de turbinas Pelton y Francis usadas en la generación de energía eléctrica, bombas, cuerpos de válvulas, partes de compresores, etc.

**Tipo de revestimiento** ... .. Relleno Metálico

**Metal depositado** ... .. C - Si - Mn - Cr - Ni - Mo

**Polaridad** ... .. DC\*



**Clasificaciones aplicables.**

**DIN 8556** : ..... SG 134

**AWS A 5.4** : ..... E410NiMo-15

**ISO 3581 - A** : ..... E 13 4 B 42

**EN 1600** : ..... E 13 4 B 42

**Tabla 9. Material base**

<b>UNS</b>	<b>Aleación</b>	<b>Símbolo EN</b>	<b>Material N°</b>
J9 1540	CA6-NM	G-X5CrNi 13-4	1,4313
		X3CrNiMo 13-	
S4 1500		4	1,4313
		G-X4CrNi 13-4	1,4317
		G-X5CrNi 13-4	1,4407
		X3CrNiMo 13-	
		4	1,4413
		G-X4CrNi 13-4	1,4414

**Tabla 10. Composición química típica del material depositado**

<b>Fundente</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
Tubrod 410 NiMo + 100%						
CO <sub>2</sub>	0.04	0.40	1.50	12.5	5.0	0.45

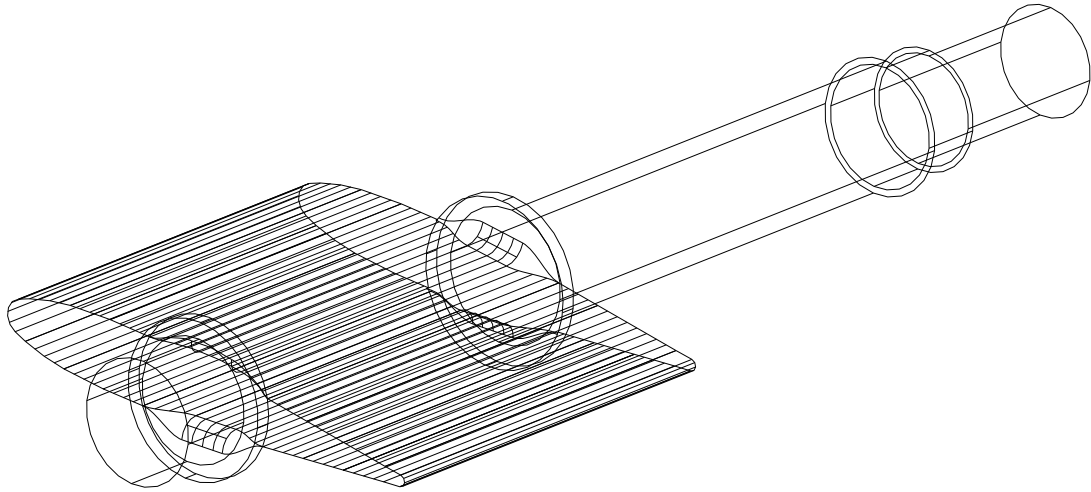
**Tabla 11. Propiedades mecánicas de la soldadura**

Propiedades Mecánicas	Límite	Resistencia	A largamiento	Impacto (Charpy	
	Elastico			V)	
	(MPa)	Tracción (Mpa)	(%)	(°C)	(Joule)
Resultados del metal aportado con 100 % CO <sub>2</sub>	879	95	19	-20/38	25/45
Observaciones:  Tipo de Junta: A W S  Tratamiento Térmico: 8 H - 580 - 600 °C					

**Tabla 12. Dimensiones, empaques y datos técnicos**

Diámetro (mm)	Corriente (A)	Voltaje de Arco (V)	Rendimiento (gMD/100g alambre)	Tasa de Depósito (Kg/h)	Presentación
1.6 (1/16")	200	27	86	3.00	Carrete plástico con 12.5 Kg
	250	28	87	5.20	
	300	29	87	6.80	
	350	30	87	7.40	

Se presenta a continuación el esquema en tres dimensiones del álabe que será sometido a los respectivos procesos en el horno que es objeto del siguiente estudio.



**Figura 10. Esquema del álabe**

#### **3.2.1.2. Conductividad térmica**

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. La inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor.

#### **3.2.1.3. Especificaciones**

A continuación se exponen algunas especificaciones respecto al proceso de reparación por soldadura del álabe móvil. Esta información es proveída por el fabricante al archivo técnico de la empresa.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> WE - 41403 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, CO., LTD.

1. Esm erilado de la superficie para soldadura.

El área afectada por cavitación o picadura, debería ser esmerilada y preparada para soldadura

2. El área esmerilada deberá ser inspeccionada mediante líquidos penetrantes para verificar la eliminación total de los defectos.

3. Pre calentamiento

Se debe realizar un pre calentamiento a más de 150 °C por medio de un quemador a gas, chequeándose la temperatura por medio de una tiza térmica.

4. Soldadura (Soldadura de arco protegido)

Electrodo: A W S E R 309 L (N C 39L)

#### 4.1 Primera capa

Soldadura a tope sobre toda la superficie.

#### 4.2 Esm erilar el chaflán hasta eliminar las ondulaciones

#### 4.3 Segunda capa y capas subsiguientes

La segunda capa deberá ser soldada de acuerdo a lo que se indica en la figura.

- La temperatura en los inter – pasos debería ser menor a 170 °C y deberá verificarse utilizando tiza térmica.
- Para cada capa de soldadura se debe efectuar un martillado como se indica en la figura.

4.4 El templado del chaflán de soldadura debe ser realizado.

4.5 Tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Después de la soldadura, la totalidad del área soldada debe ser calentada a una temperatura de 600 °C. Este rango de temperatura debe ser mantenido durante siete horas, para posteriormente ser enfriada lentamente, cubriendo la superficie con lana de vidrio.

## 5. Esmilado

Los refuerzos de soldadura deben ser esmerilados en tal forma que se logre una superficie uniformemente lisa.

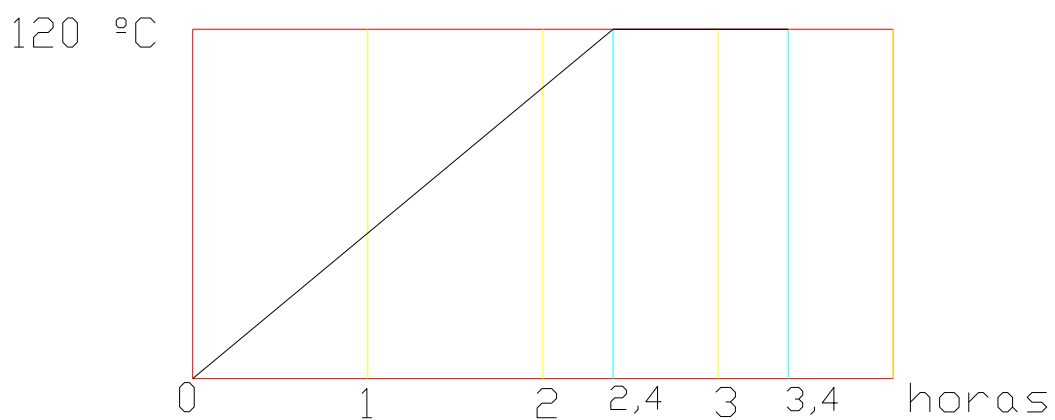
## 6. Confirmación e inspección.

La superficie del área soldada deberá ser inspeccionada utilizando líquidos penetrantes, para verificar que no existan defectos.

Es indispensable indicar que el presente trabajo realizará algunas modificaciones a las recomendaciones del fabricante antes expuestas, básicamente por la factibilidad de contar con un equipo que facilite ambos procesos: calentamiento y el posterior tratamiento térmico, los mismos que se realizarán a través de calentamiento eléctrico.

Por otro lado las mejoras en los materiales y procesos, después de 20 años posteriores a la emisión de éstas recomendaciones hacen que se evidencien ciertas variaciones como por ejemplo el uso del electrodo recomendado por el fabricante, puesto que en la actualidad para el proceso de reparación por soldadura del álabe se utiliza el electrodo AWS A 5.4, cuyas propiedades han sido expuestas ya en el apartado 3.2.2 Material.

Así también la empresa especifica que para el calentamiento del álabe previo al proceso de soldadura se debe elevar la temperatura a 120 °C.



**Figura 11. Ciclo de Precalentamiento de los álabe, previo a la soldadura**

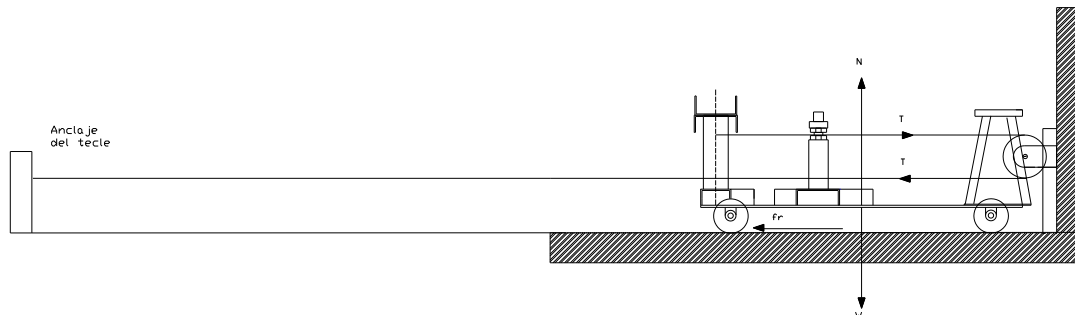
#### **3.2.1.4. Sistema de transporte de los elementos hacia el interior del horno**

Una vez que se hayan montado los dos álabes en la vagoneta, el conjunto de la carga superaría la tonelada de peso, por esta razón el empuje manual de la carga hacia el interior del horno, así como el arrastre de la misma hacia el exterior sería una operación incómoda y dificultosa.

Por otra parte, es necesario tomar en cuenta que cuando se necesite extraer la carga luego del calentamiento previo a la reparación por soldadura, la carga se encontrará a una temperatura de 120 °C. Por lo tanto el manejo de estos materiales calientes hasta esa temperatura implica un riesgo de seguridad para el personal encargado de la operación, en la que sería mejor evitar el contacto directo con éstos elementos calientes.

Tomando en consideración las observaciones anteriores, para esta aplicación en concreto, el arrastre de la carga hacia el interior del horno se realizará a través de un tecele conectado a una polea anclada en la pared posterior del horno, que conducirá a la vagoneta hacia el interior del horno, a través de una guía compuesta por rieles.

De esta manera se facilitará el manejo del peso del conjunto álabes – vagoneta, para las operaciones de carga y descarga del horno, así como disminuir el riesgo de quemaduras en el personal, por contacto de los elementos calientes.



**Figura 12. Sistema de transporte**

### 3.2.1.5. Construcción.

La cámara de calentamiento de un horno eléctrico estándar, es un recinto con revestimiento refractario, una capa circundante de aislamiento térmico y una cubierta exterior de placa de acero.

El horno ubicado en los talleres de Hidroagoyán está construido utilizando varios tipos de ladrillos refractarios.

En este apartado se amplía la información al respecto de este material empleado en la construcción de la estructura.

Son refractarios aquellos materiales capaces de soportar elevadas temperaturas. Los materiales refractarios por excelencia son las cerámicas.

Algunos materiales cerámicos pueden soportar temperaturas extremadamente altas sin perder su solidez. Son los denominados *materiales refractarios*. Generalmente tienen baja conductividad térmica por lo que son empleados como aislantes.

Los requisitos principales para considerar a un material refractario como bueno son que no se ablande o derrita y que se mantenga sin reacciones bajo las temperaturas de uso.



Diseñados para esa función, una situación sin sobresaltos requiere un control responsable sobre todos los aspectos de la construcción y uso.

Los refractarios deben soportar altas temperaturas sin corroerse o debilitarse por el entorno. Los refractarios típicos están compuestos por diversas partículas gruesas de óxido aglutinadas con un material refractario más fino

El material refractario, se utiliza en todos los hornos industriales que se usan en refinерías de petróleo, industria química, industria siderúrgica y metalúrgica, cementeras, ladrilleras, cerámicas, industrias del vidrio, etc.

Los refractarios se dividen en cuatro grupos: ácidos, básicos, neutros y especiales con base en su comportamiento químico.

#### **Presentación del material refractario**

- **Mortero refractario** Se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para tomar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

El techo del horno será construido con ladrillos refractarios, para lo cual bastará con el stock que se dispone en bodega de éstos materiales. Hay que recordar que la configuración del mismo será plana. Por lo tanto se requerirá también al menos un saco de cemento refractario para fundir.

Por disponibilidad en el mercado nacional se recomienda el cemento refractario para fundir CONCRAX 1500 para 1.500 grados de temperatura, que satisface con holgura el requerimiento de esta aplicación.

**Ladrillo refractario:** El ladrillo refractario tiene sus caras lisas, lo que disminuye la adherencia con el mortero, resiste bien las altas temperaturas y la abrasión, es buen aislante térmico y es relativamente caro (actualmente el precio de un ladrillo refractario equivale aproximadamente al precio de diez ladrillos comunes).

Básicamente para esta aplicación específica se trata de ladrillos refractarios para fuego directo, cuyo fabricante se desconoce, sin embargo se presentan a continuación algunas generalidades sobre este tipo de materiales.

Estos ladrillos se suelen clasificar según las temperaturas a los que serán expuestos; es así como se encuentran en el mercado las siguientes opciones:

- Ladrillos refractarios para grandes temperaturas (temperaturas de fusión interior, mayor que 1744°C)
- Ladrillos medianamente refractarios (temperatura de fusión mayor que 1615 °C) y ladrillos ligeramente refractarios.

#### **3.2.1.6. Sistema de calefacción**

El sistema de calefacción instalado en el horno es en base a cinco lámparas de cuarzo distribuidas de la siguiente manera:

- Dos lámparas en cada pared lateral
- Una lámpara montada en el techo articulado del horno.

Con este sistema se llega a alcanzar 90 °C, con un encendido previo de un día.

Las lámparas de cuarzo montadas en el horno son del mismo tipo que las que se emplean en la iluminación del caracol en tareas de mantenimiento.

Éstas lámparas de cuarzo funcionan con 220 Voltios de corriente alterna y 1500 Watts.

A continuación se exponen algunas características de las lámparas de cuarzo.

### **Cuarzo lineal**

#### **Denominaciones**

Algunas denominaciones para esta lámpara son:

- Halostar (Osram)
- Doble terminal (Philips)
- Deq (General Electric)

#### **Características**

- Conexión directa a 220 volts.
- Disponibles en una gran variedad de potencias (de 60 a 2000 W).
- Luz brillante.
- Vida promedio: 2000 h.

Lo que hace particular a este tipo de lámparas es que en vez de utilizar el cristal común que emplean las lámparas incandescentes normales como cubierta protectora, incapaz de soportar la altísima temperatura a la que se somete el filamento de tungsteno, se emplea cristal de cuarzo.

A demás el gas protector que envuelve al filamento que usualmente es argón fue cambiado por yodo o bromo

### **3.3. Análisis técnico del horno**

Actualmente el horno es utilizado para eliminar el hidrógeno de los álabes móviles, o lo que es lo mismo eliminar la posible humedad por las condiciones de trabajo de éstos elementos mecánicos.

Esta operación debe realizarse cada vez que se vaya a reparar con soldadura el desgaste producido en los álabes. La capacidad del horno en la operación de calentamiento es de un álabe por carga.

Es necesario señalar que este horno fue construído a modo experimental, por que no se emplearon los suficientes criterios técnicos en su construcción, por lo tanto ni siquiera existe en el archivo de la empresa una ficha técnica que haga alusión a este equipo.

### **3.4. Diagnóstico del estado actual del horno**

El horno está construído de diferentes tipos de ladrillos refractarios, en las paredes y en el piso. Se sabe, sin embargo, que básicamente son ladrillos de caldera que se adquirieron en Termo Esmeraldas, de ahí que en adelante se asume que se trata de ladrillo de fuego directo para la determinación de su coeficiente de conductividad térmica, necesario en el cálculo de transferencia de calor a través de las paredes del horno.

La calefacción del horno se realiza a través de cinco lámparas de cuarzo distribuidas de la siguiente manera:

- 2 lámparas en cada pared lateral
- Una lámpara en el techo.

La alimentación del horno es de 220 V de Corriente alterna.

El sistema de carga consta de una vagoneta, que soporta un álabe a la vez, montada sobre dos rieles que se internan en el interior del horno. Así también el fondo de éstos rieles se encuentra a 5 cm por debajo del nivel del suelo del taller.

Básicamente la vagoneta está montada sobre una placa de acero de 1 cm de espesor, sobre la que se han soldado perfiles y tuberías que soportan al álabe en posición horizontal.

El techo del horno es articulado con el propósito proveer una segunda alternativa de depósito y recuperación del álabe en el interior del mismo.

Al igual que el techo del horno, la puerta está articulada en el costado izquierdo con bisagras, es de construcción ligera.

Hay que indicar que horno no alcanza la temperatura especificada por el fabricante para la operación de precalentamiento de los álabes antes de ser sometidos a la reparación por soldadura, sin embargo es utilizado para éste propósito

### 3.5.Principales problemas existentes en el horno

Se pueden identificar los siguientes problemas en el horno que se pretende rehabilitar:

- Se evidencia que el horno actual, tiene un gran flujo de calor que se pierde a través de las paredes de ladrillos refractarios
- No existe un de aislamiento térmico adecuado en toda las superficies del horno
- Los ladrillos refractarios que conforman la estructura del horno son de diferentes clases y no existe un registro con sus especificaciones
- El piso del horno se encuentra en contacto directo con el piso del taller lo que lo convierte en un sumidero de calor. Además es imposible realizar un aislamiento térmico en esta zona debido a que esta operación requeriría el desmontaje de los rieles del sistema de carga, esto implicaría un aumento del trabajo y del costo de rehabilitación.
- El techo no es de material refractario sino una cubierta de aislamiento para aire acondicionado contenido en un marco metálico, protegido hacia el exterior por chapa metálica, y hacia el interior suspendido por malla metálica.
- La puerta es ligera pero igualmente es sólo un relleno de aislante para aire acondicionado contenido en un marco fabricado de perfiles metálicos y protegida por ambas caras con chapa metálica

- La pared posterior se encuentra junto a la pared de ladrillo común de la nave del taller.
- La introducción de la carga en el horno se realiza a través de un empuje manual a la vagoneta, que una vez cargada, alcanza un peso de 688 Kg.

### **3.6. Alternativas de optimización.**

Con el propósito de disminuir las pérdidas de calor a través de las superficies del horno se sugieren las siguientes alternativas de optimización:

- El techo se construirá también de ladrillo refractario, observando que la articulación de éste elemento no es necesaria, en todo caso una construcción con ladrillo refractario debe implicar un aumento en la eficiencia del equipo.
- La puerta será también construída de material refractario, por las razones anteriormente expuestas, sin embargo éste criterio hará que la puerta aumente significativamente de peso por lo que la puerta no podría ya ser simplemente articulada en uno de sus costados, por lo que debería diseñarse un sistema de cierre adecuado que soporte el peso de la misma o en su defecto utilizar un material refractario pero a la vez liviano que facilite el cierre de la misma.
- Se empleará lana de vidrio para el aislamiento térmico de todas las superficies del horno a excepción del piso, con esta medida

se pretende disminuir el flujo de calor a través de las paredes, así como mejorar la eficiencia del equipo. Y de esta manera mantener también una temperatura de operación segura para el personal que labore en las cercanías del horno, puesto que con la inclusión del proceso de revenido, se manejarán temperaturas bastante elevadas en el interior del horno.

- Se realizarán adecuaciones en la pared posterior del horno, ya que al estar en contacto directo con la pared de la nave donde funciona el taller mecánico, se comporta como un sumidero de calor, además la alta temperatura que podría alcanzarse en el exterior de la pared del taller sería un riesgo para el personal y un peligro latente de incendio, por lo que, de ser el caso deben tomarse las medidas correctivas necesarias.
- La vagoneta transporta un álabe en cada carga, si el álabe es rotado 90° de la posición actual, permitiría despejar suficiente espacio para ingresar dos álabes en cada carga, para ello deberán realizarse algunas modificaciones a la vagoneta de carga, para que cumpla con este cometido.
- Como la carga de dos álabes implica un aumento del peso que debe transportarse hacia el interior del horno se debe diseñar un sistema de carga que facilite el manejo de las masas que serán sometidas al tratamiento. Se sugiere para tal efecto el arrastre de la vagoneta a través de cadenas o cables conectados a un sistema de poleas y a un tecele.



- Como las exigencias de temperatura son mayores para el tratamiento que se desea incluir, el sistema de calefacción debe ser notablemente mejorado, por lo que se decide cambiarlo por resistencias eléctricas para tal efecto.

La estructura del horno se encuentra en buen estado, por tal motivo se decide aprovechar la estructura ya montada del horno, con las debidas modificaciones ya descritas.

Del mismo modo el sistema de transporte de la carga hacia el interior del horno se mantendrá incluyendo unas pocas mejoras que ya fueron enunciadas

#### **3.6.1. Paneles laterales**

Las paredes laterales del horno están construidas con ladrillo refractario. Como ya se ha mencionado anteriormente no existe una ficha técnica del horno por lo tanto no existen datos acerca de las propiedades y el criterio con el que se seleccionaron los materiales del horno.

En bodega existe un pequeño stock de ladrillos refractarios del mismo tipo del utilizado en las paredes laterales del horno, se sabe además que este ladrillo es un material refractario utilizado en calderas que fue comprado a Termo Esmeraldas.

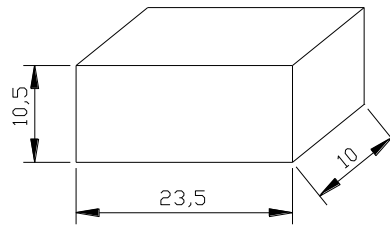
Tomando una muestra de este ladrillo, se determinó su densidad a partir de sus dimensiones geométricas y su peso.

**Peso del ladrillo refractario:** 4,3 Kg

$$= 9,4815 \text{ lb.}$$

**Dimensiones del ladrillo:** (10 x 10,5 x 23,5) cm.

**Volumen del ladrillo:** 2467,5 cm<sup>3</sup>



**Figura 13. Dimensiones del ladrillo refractario**

Aplicando un factor de conversión que nos permita traducir el volumen a unidades coherentes, tenemos:

$$2467,5 \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ pie}^3}{28320 \text{ cm}^3} = 0,0871 \text{ pie}^3$$

Con éstos datos podemos calcular la densidad del ladrillo refractario:

$$\partial = \frac{m}{V}$$

Donde:

$$\partial = \text{Densidad en lb/pie}^3$$

$m$  = masa en lb.

$V$  = Volumen en pie<sup>3</sup>

Reemplazando valores en la ecuación se tiene:

$$\partial = \frac{9,4815 \text{ lb}}{0,08712 \text{ pie}^3}$$

$$\hat{\rho} = 108,82 \text{ lb/pe}^3$$

Considerando el valor de la densidad obtenido y sabiendo que su aplicación es para calderas, comparamos esta densidad con la densidad tabulada para un ladrillo refractario de fuego directo.

(Tabla 3 Anexos CHAPTER 36. PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS)

Fireclay brick  $\hat{\rho} = 112 \text{ lb/ft}^3$

Debido a que este es el valor más aproximado a la densidad del ladrillo estudiado, se asumirán las propiedades tabuladas como las propiedades del refractario empleado.

Entonces para los cálculos pertinentes se considerarán los siguientes valores:

<b>Calor específico:</b>	0,198 Btu/lb.°F
<b>Conductividad Térmica:</b>	0,58 Btu/h.pe.°F
<b>Emisividad:</b>	0,75 (A 1832 °F)
<b>Densidad:</b>	112 lb/ft <sup>3</sup>

### 3.6.2. Aislantes

Al considerar la posibilidad de recubrir el horno con algún material aislante térmico, el primer paso es analizar la real necesidad de dicho complemento.

Para ello debemos realizar un primer análisis de la temperatura que el horno alcanzaría en el lado expuesto de la pared lateral, dicha temperatura debe alcanzar un valor seguro

para los operadores que pudieran estar realizando sus labores en esta zona del taller, dicho de otro modo la temperatura exterior del horno no debería representar un peligro para el personal que labore en sus cercanías.

De no ser así, sería evidente la necesidad de colocar un aislamiento adecuado que garantice que la temperatura en el exterior del horno sea lo suficientemente baja como para no representar un peligro para el entorno circundante.

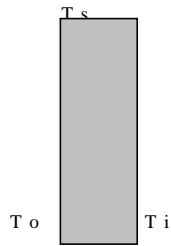
Además una temperatura elevada en el exterior de las paredes del horno representaría, una también elevada pérdida de calor del sistema, entonces el recubrimiento con material aislante sería imprescindible.

Se sabe que el requerimiento para el revenido de los álabes es de mantenerlos a 600 °C durante 7 horas, para garantizar que se alcance esta temperatura por encima de las pérdidas de calor que pudieran existir, se considera que la temperatura de diseño sea de 700 °C.

Las mediciones realizadas en el taller donde se localiza el horno para tratamientos térmicos indican que la temperatura ambiente promedio es de 20 °C.

Por las razones de seguridad del personal y de eficiencia del horno se asume que la temperatura en la pared exterior del horno no debería exceder los 60 °C.

En el gráfico puede observarse el planteamiento de las temperaturas a las que estaría sometida la pared:



**Figura 14. Temperaturas en la pared del horno**

A continuación se detalla el proceso de cálculo para esta parte del problema:

Donde:

$T_o$  = Temperatura ambiente

$T_s$  = Temperatura en la pared exterior

$T_i$  = Temperatura en el interior del horno.

Se asumen además los coeficientes de convektividad tanto para el exterior como para el interior del horno. Considerando el ambiente en convektividad natural

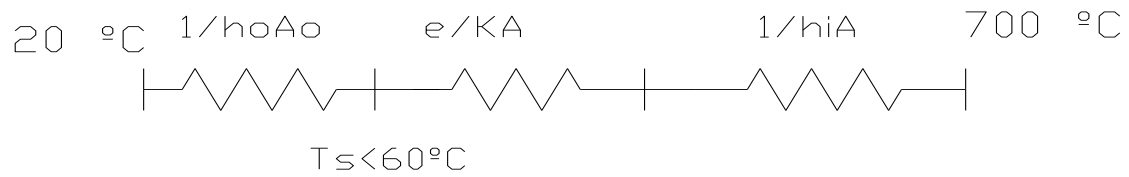
$$h_o = 1.5 \text{ Btu/h.pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$h_i = 2 \text{ Btu/h.pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}.$$

Por las consideraciones anteriores se considerará el respectivo coeficiente de conductividad térmica para el ladrillo refractario.

$$K = 0.58 \text{ Btu/h.pie} \cdot ^\circ\text{F}.$$

Graficando el circuito térmico tenemos:



**Figura 15. Circuito térmico de la pared**

Partiendo de la ecuación:

$$q = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Y considerando además que el flujo del calor será el mismo en cualquier punto del circuito térmico, ya que se trata de un circuito en serie, entonces analizamos el mismo hasta un punto en la pared exterior donde se presente  $T_s$ .

Entonces tenemos:

$$q = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$q_1 = \frac{T_i - T_s}{\frac{e}{K * A} + \frac{1}{h_i}}$$

$$q_2 = \frac{T_s - 68^{\circ} F}{\frac{1}{h_o A_o}}$$

En donde:

$q$  = El flujo de calor a lo largo del circuito térmico

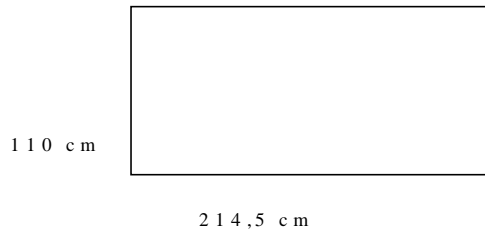
$e$  = Espesor de la pared de ladrillos refractarios = 100 mm = 0.328 pie

$K$  = Coeficiente de Conductividad térmica del refractario

$A$  = Área perpendicular de la pared

$h_i$  = Coeficiente de convección para el interior del horno.

Se calcula el área de la pared en cuestión.



**Figura 16. Área de la pared del horno**

$$A = (110 \text{ cm} \times 214,5 \text{ cm})$$

$$A = 23\,595 \text{ cm}^2 = 25,398 \text{ pie}^2$$

Convertimos también las temperaturas a la escala Fahrenheit:

$$700 \text{ }^\circ\text{C} = 1292 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$60 \text{ }^\circ\text{C} = 140 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F}$$

Reemplazando datos en las ecuaciones se tiene:

$$q_1 = \frac{1292^\circ F - T_s}{\frac{0.328 \text{ pie}}{0,58 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{pie} \cdot ^\circ F} * 25,39 \text{ pie}^2} + \frac{1}{2 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ F} * 25,39 \text{ pie}^2}}$$

$$q_1 = \frac{1292^\circ F - T_s}{0.0418 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot ^\circ F}}$$

$$q_2 = \frac{T_s - 68^\circ F}{\frac{1}{h_o \cdot A_o}}$$

$$q_2 = \frac{T_s - 68^\circ F}{1} \div \left( 1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 25,39 pie^2 \right)$$

$$q_2 = \frac{T_s - 68^\circ F}{0,0262 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F}}$$

Si consideramos que:  $q_1 = q_2$

Entonces tenemos:

$$\frac{1292^\circ F - T_s}{0,0418 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F}} = \frac{T_s - 68^\circ F}{0,0262 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F}}$$

De donde se obtiene que:

$$T_s = 539,59^\circ F = 281,99^\circ C.$$

Como  $T_s$  en la pared exterior del horno es mucho más alta que el rango previsto por seguridad, se evidencia la necesidad imperativa de usar un recubrimiento aislante que provea un uso seguro del equipo y que además disminuya las pérdidas de calor a través de las paredes.

El aislamiento térmico trata de reducir las elevadas pérdidas térmicas a través del cerramiento de los equipos, depósitos y tuberías, etc. que debido a las sollicitaciones mecánicas y/o, a las elevadas temperaturas, se construyen de materiales que se ven expuestos a elevadas temperaturas.



La reducción del flujo de calor aportada por el aislamiento, supone en primer lugar un ahorro importante en la partida correspondiente al costo energético, pero también posibilita el correcto desarrollo de los diferentes procesos industriales.

Otra parte importante a considerar como consecuencia de la reducción de las fugas térmicas, es el control de temperatura de la superficie exterior (cara fría), que puede suponer un riesgo para las personas (quemaduras), así como evitar su incidencia sobre la temperatura ambiente, cuando los equipos se sitúan en locales con presencia de personas (mantenimiento u otra actividad).

Los materiales aislantes para esta aplicación, se presentan en forma de mantas o fieltros y en forma de paneles flexibles o semirrígidos, eligiendo en cada caso el más idóneo de acuerdo con la temperatura de trabajo y su mejor adaptabilidad para el montaje, en función de las características geométricas y dimensiones de los equipos.

Hay un elemento común que habría de tenerse en cuenta en todo tipo de montaje de aislamiento: La preparación de la superficie a aislar. Ésta ha de estar, en la medida de lo posible, libre de humedades y de partículas sueltas provenientes del montaje (rebabas, restos, tierra, suciedad etc.).

### **3.6.3. Tipo de paneles**

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

El aislamiento térmico se selecciona para reducir el flujo de calor. La eficacia aislante se juzga sobre la base de la conductividad térmica y depende de la estructura física y química del material.

El calor transferido a través de un aislamiento ocurre por conducción en sólidos, convección y por radiación.

### **Aislamientos térmicos**

La mayoría de los procesos industriales necesitan altas temperaturas, lo cual genera pérdida o ganancias de calor y esto se ve reflejado en altos costos para mantener la temperatura necesaria del proceso.

Estas pérdidas o ganancias de calor se pueden reducir al mínimo con el uso de aislamientos, ya que estos evitan estas pérdidas o ganancias de calor. No todas las propiedades de los materiales de un aislamiento influyen como criterio de diseño en una aplicación específica y otras hay necesidad de consultarlas directamente con los fabricantes.

### **Propiedades de la lana de vidrio**

#### **Propiedades térmicas**

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado cuanto más pequeña es su conductividad.

El valor de dicha conductividad varía de 0,032 a 0,045 W/(m · K) (a 10 °C), para los productos de aplicación en la construcción.

El material que se ha seleccionado es la Lana Superfina de Vidrio que es un producto de la fábrica Andifibras, localizada en la ciudad de Riobamba, puesto que se trata de una innovación en el mercado nacional, y constituye una buena alternativa para aislamiento en diferentes medios, como superficies planas, o sistemas de conducción en estado estacionario.

Andifibras, ha realizado numerosas pruebas de laboratorio con excelentes resultados en cuanto a eficiencia de aislamiento, disminución en la conductividad térmica, cálculo del radio crítico de espesor de aislamiento, resistencia al ataque químico de ácidos, bases y solventes orgánicos, así como la impermeabilización de estos productos cuando sean sometidos a temperaturas inferiores a 10 y hasta 30 °C.

Las características técnicas de la Lana Superfina de Vidrio de Andifibras son las siguientes:

<b>Diámetro de la fibra:</b>	5 – 6 micras
<b>Densidad:</b>	30 y 60 Kg./m <sup>3</sup>
<b>Temperatura de Servicio:</b>	- 30 a 450 °C
<b>Calor específico:</b>	0,24 Kcal./Kg °C
<b>Coefficiente de Conductividad Térmica:</b>	0,029 Btu/h pie °F 0,04311 Kcal/h m °K

Este producto está disponible en colchonetas de las siguientes características:

<b>Espesor de la colchoneta:</b>	1" ; 1 ½" ; 2" ; 2 ½" ; 3" y 4"
<b>Largo:</b>	5 m
<b>Ancho:</b>	0,65 m
<b>Superficie por colchoneta:</b>	3,25 m <sup>2</sup>
<b>Empaque:</b>	Fundas de polietileno.

#### **Fibra Cerámica Refractaria.**

Las fibras cerámicas son el resultado de fundir una mezcla proporcional de sílice y alúmina en un horno de arco eléctrico a temperaturas tan altas que permiten obtener un aislamiento de una pureza y calidad excepcionalmente diseñado para aplicaciones a muy altas temperaturas y a un menor costo.

#### **Presentaciones:**

Por su versatilidad la fibra cerámica puede usarse a granel, como colchoneta y módulos, en tablas y formas rígidas, como papel flexible, puede troquelarse para formar sellos y juntas, como cementos moldeables para la fabricación de canales, quemadores, tapas de hornos. Por su manejabilidad puede conformar cualquier superficie, otras formas son los productos textiles sustitutos del asbesto.

En promedio la conductividad térmica, a 700 °C será de:

$$0,25 \text{ W/m K} = 0,215 \text{ kcal/m h}^\circ\text{C} = 0,144 \text{ Btu/pie}^2\text{h}^\circ\text{F}$$

Este será el valor de conductividad térmica de la lana de cerámica que se considera en la memoria de cálculo para este trabajo en particular.

La selección de fibra cerámica refractaria para el relleno de la puerta será en base a la disposición del mercado nacional, en presentación de Manta cerámica, en densidad de 8 lbs / pie cúbico, en espesor de 1" y vienen en cajas de 4.65m<sup>2</sup> (6.70 x .70). La fibra cerámica B8 resiste temperaturas de 1260 grados centígrados.

#### **3.6.4. Recubrimiento y techos**

Ya se ha mencionado anteriormente que el recubrimiento actual del horno para el tratamiento de los álabes móviles, es bastante precario por tratarse de un equipo experimental.

Este recubrimiento sólo abarca al techo y a la puerta del horno, siendo su componente principal, pues estas zonas carecen de material refractario.

Además es necesario recalcar que el aislamiento empleado para tales efectos corresponde a lana de vidrio destinada al aislamiento de equipos de aire acondicionado.

El techo del horno es netamente un relleno de lana de vidrio contenido en un bastidor metálico, protegido por el lado exterior por una chapa metálica y del lado expuesto a la carga, el relleno se encuentra suspendido por una malla metálica.

La propuesta de mejora en el diseño de esta zona implicará la construcción de un techo plano a base de ladrillos refractarios, recubiertos con lana de vidrio de propiedades especificadas más adelante.

A manera informativa se presentan brevemente algunas nuevas tendencias en la construcción de techos para hornos industriales.

### Perfeccionamientos en techos planos para hornos

Consiste en una serie de placas, con sus caras yuxtapuestas con el perfil ondulado, formándose pasos laberínticos que dificultan las fugas térmicas del interior del horno; en el interior del horno existen bocas de fuego, bocas pirométricas que se apoyan, por un lado, sobre las alas de las dos piezas de suspensión y, por otro, sobre los bordes superiores de las caras irregulares de las placas, cubriendo la zona de yuxtaposición.

Las piezas que constituyen las bocas de acceso al interior del horno están constituidas por dos piezas complementarias dotadas de escotadura, presentando en dos de sus caras opuestas talones para el apoyo en las alas de las piezas de suspensión de las placas.

### Estructura de arco de apoyo.

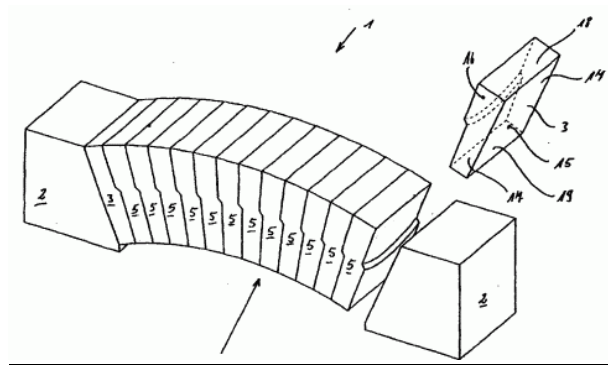


Figura 17. Estructura de arco de apoyo

Especialmente diseñada para hornos industriales con elementos de salmer (2) así como una imposta (3) contigua a cada elemento de salmer (2), con lo que entre los sillares de imposta (3) se extiende un arco de apoyo (4) compuesto de varias dovelas (5) de igual diseño que presentan una pared delantera de apoyo, una pared trasera de apoyo, una pared superior, una pared inferior así como dos paredes laterales y donde las dovelas (5) presentan sobre una pared de apoyo un primer contorno conformado como escalón y, sobre la pared de apoyo opuesta presenta un segundo contorno entrante en forma de escalón, cuyo segundo contorno entrante coincide con el primer contorno y encaja en el primer contorno de un elemento de arco de apoyo, caracterizada porque:

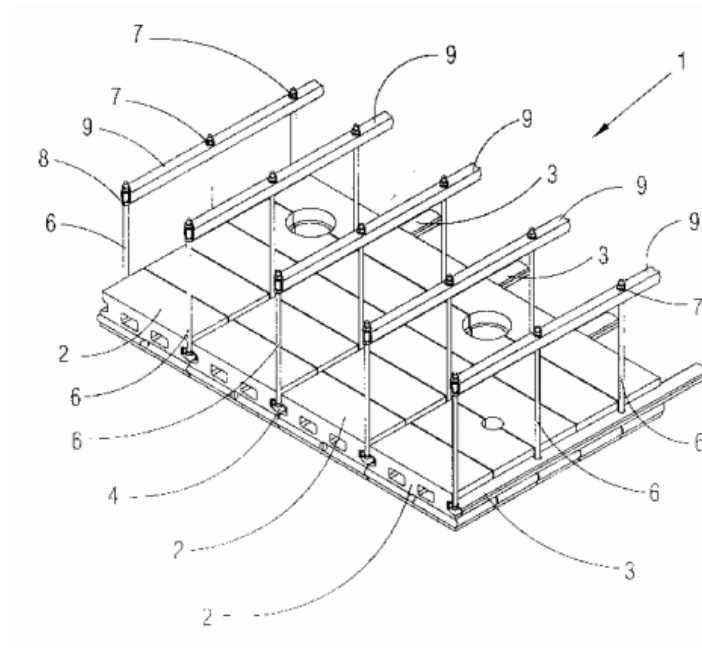
a) las dovelas (5) están conformadas cuneiformes, la pared delantera de apoyo y la pared trasera de apoyo, partiendo de la pared superior, confluyen hacia la pared inferior en común,

b) los escalones se extienden cada uno desde una pared lateral hacia la pared lateral opuesta,

c) el escalón del primer contorno es curvado de forma cóncava hacia abajo a la pared inferior.

d) y el escalón del segundo contorno es curvado de forma convexa hacia abajo a la pared inferior.

**Bóveda cerámica para horno industrial.**



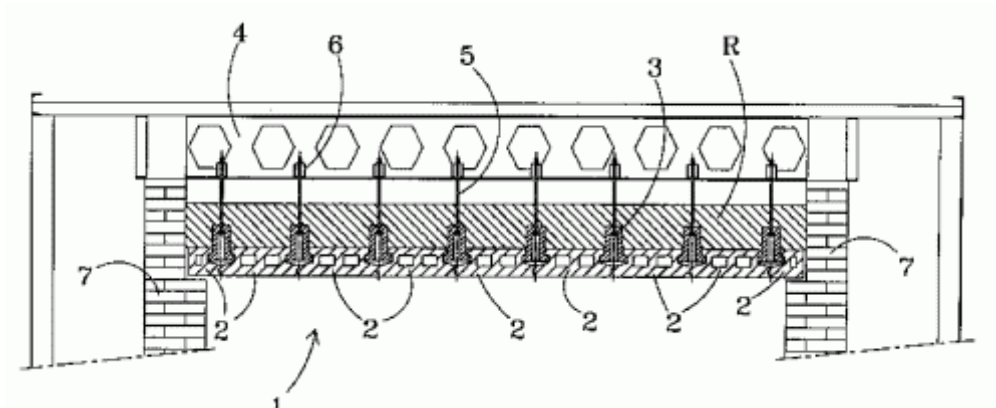
**Figura 18. Bóveda cerámica para horno industrial (a)**

Comprende una pluralidad de bovedillas (2) y una pluralidad de soportes de dichas bovedillas (2) suspendidos de una estructura situada sobre la bóveda (1), comprendiendo dichos soportes una base en contacto con las bovedillas (2) y un vástago de unión (6) a la citada estructura, y se caracteriza porque comprende para una pluralidad de bovedillas (2) por lo menos una pletina de acero refractario (3) dispuesta en el alojamiento (4) de las bovedillas (2), siendo la citada pletina (3) sostenida por los correspondientes vástagos de unión (6), y porque las bovedillas (2) comprenden alojamientos (4) y salientes complementarios encajables de modo que el conjunto de bovedillas (2) cubre toda la superficie de la bóveda (1) del horno.

Se evita así que el fuego del interior del horno pueda penetrar a través de las bovedillas hacia la parte superior y dañe la estructura metálica que soporta la bóveda.



**Bóveda cerámica para horno industrial.**



**Figura 19. Bóveda cerámica para horno industrial (b)**

Las bovedillas (2) comprenden sendos alojamientos laterales donde se acoplan los soportes (3), quedando éstos protegidos de las llamas, al cubrir las bovedillas (2) toda la superficie de la bóveda (1) del horno.

Se consigue que los soportes (3) de las bovedillas (2) queden ocultos bajo éstas con lo cual, además de evitarse los choques térmicos y los ataques químicos sobre los soportes (3), se consigue alargar la vida útil de éstos que, en definitiva, son los que han de aguantar toda la bóveda (1).

### Conjunto de piedra de cierre

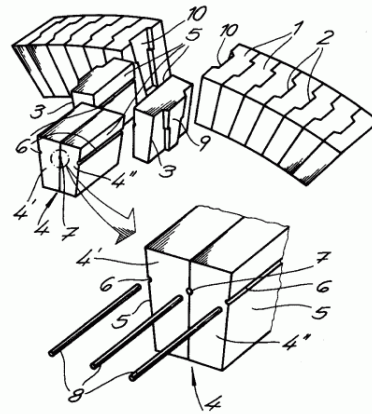


Figura 20. Conjunto de piedra de cierre

La aplicación se refiere a un conjunto de piedra de cierre para una bóveda de piedras refractarias que consta de dos piedras adaptadoras (3) que se unen solidariamente a las piedras refractarias (1) y una piedra clave (4) cuneiforme que se coloca en el espacio de cierre entre las piedras adaptadoras (3). las piedras adaptadoras y la piedra clave, que son piedras de magnesia, se colocan en un lecho de junta de mortero. de acuerdo con la aplicación en particular, las superficies de unión (5) de las piedras adaptadoras (3) y de la piedra clave (4), que en su estado definitivo se apoyan unas contra otras, son superficies planas y sin irregularidades y poseen ranuras (6) confrontadas entre si que, una vez colocada la piedra clave (4), conforman un canal abierto (7) en la cara frontal. Los canales (7) reciben finalmente una barra sólida de acoplamiento (8) de acero sin ninguna aleación, que se introduce por la cara frontal.

#### 3.6.5. Estructura y tipo actual

Como ya se mencionó en apartados anteriores, el horno que se montó en el taller de Hidroagoyán corresponde a un equipo de carácter experimental, de ahí que este proyecto pretende realizar mejoras en la estructura ya existente.

Para economizar materiales y peso el techo actual del horno está conformado por un marco metálico elaborado de perfiles L de 96 mm. El mismo que se encuentra recubierto por chapa metálica en el lado que da al exterior del horno.

El marco así constituido contiene en su interior un relleno de lana de vidrio utilizada para aislamiento térmico de equipos de aire acondicionado, la misma que se halla suspendida en el interior de la cámara por malla metálica, quedando ésta expuesta directamente al ambiente convectivo que se genera en la calefacción del horno.

Es importante señalar que el techo actual del horno está articulado con el propósito de facilitar otra alternativa para la carga del horno, a más de la puerta. Sin embargo se considera que esta adecuación es innecesaria en el rediseño del horno, puesto que para la carga y descarga del horno será suficiente emplear la puerta que se dispondrá para tal efecto, además al no disponer un cierre totalmente hermético entre el techo y el resto de la estructura, debido a la articulación, se podrían hacer evidentes pérdidas de calor que disminuyan el rendimiento del equipo.

## CAPÍTULO IV

### REDISEÑO DEL HORNO

#### 4.1. Parámetros de funcionamiento

##### Temperatura de revenido.

Usualmente la temperatura de revenido de los aceros al carbono está comprendida entre los 200 °C y 650 °C, según las características mecánicas que se necesiten y el porcentaje del carbono del acero que será sometido al tratamiento.

##### Medios de enfriamiento.

Los medios de enfriamiento van desde en aire al reposo, en el mismo horno que la pieza ha sido calentada, hasta en aceite o agua. En algunos casos, especialmente con aceros de alta aleación se usa el procedimiento llamado de "Chorros de aire".

Sin embargo para garantizar una uniformidad de la temperatura en la operación de enfriamiento se realizará dentro de la cámara interna del horno, de esta forma se asegura también un enfriamiento lo suficientemente lento, a razón de 10 °C por hora, como es el requerimiento de la empresa.

#### **A l i m e n t a c i ó n e l é c t r i c a :**

Para el taller en que está ubicado el horno, existe una alimentación eléctrica Trifásica de 220 V a 60 Hz.

#### **T e m p e r a t u r a a m b i e n t e :**

Dentro del ambiente cerrado del taller se midió una temperatura ambiente promedio de 20 °C.

#### **4.2. Parámetros de temperatura**

#### **Propuesta de control automático.**

Puede afirmarse que los principales objetivos que pretende el control de la temperatura en un proceso de calentamiento en un horno, son los siguientes:

- Poner la superficie expuesta de la carga a una temperatura determinada y mantener esta temperatura constante, respecto al tiempo hasta que se haya alcanzado una uniformidad específica de temperatura en la carga, o
- Variar la temperatura de la carga de acuerdo con un ciclo de calentamiento y enfriamiento especificados.

Como puede verse en cualquiera de éstos casos, es necesario mantener uniforme la temperatura de la carga dentro del horno. Las razones para alcanzar una temperatura en la carga y mantenerla constante resultan evidentes, pues para cada proceso y para cada

m a t e r i a l , e x i s t e u n a t e m p e r a t u r a m í n i m a q u e s e d e b e o b t e n e r p a r a a l c a n z a r l o s r e s u l t a d o s e s p e r a d o s .

O b v i a m e n t e u n a t e m p e r a t u r a q u e s e a e x c e s i v a p a r a e l v a l o r r e q u e r i d o e s , d e f i n i t i v a m e n t e , u n d e s p e r d i c i o d e c a l o r y p u e d e a c a r r e a r c o n s i g o e f e c t o s i n d e s e a b l e s , c o m o o x i d a c i ó n , d e s c a r b u r a c i ó n y a v e r í a s e n e l p r o c e s o .

#### **P r i n c i p i o s d e c o n t r o l a u t o m á t i c o :**

P a r a o b t e n e r l o s r e s u l t a d o s e s p e r a d o s e n e l t r a t a m i e n t o t é r m i c o e s p r e c i s a m e n t e e j e r c e r e l c o n t r o l s o b r e a l g u n a s m a g n i t u d e s f í s i c a s p r e s e n t e s e n e l p r o c e s o . B á s i c a m e n t e l a m a g n i t u d p r i n c i p a l o b v i a m e n t e e s l a t e m p e r a t u r a , s i n e m b a r g o l a m e d i c i ó n y p o s t e r i o r c o n t r o l d e é s t a m a g n i t u d s e b a s a e n e l r e g i s t r o d e o t r a s m a g n i t u d e s a n á l o g a s c o m o v o l t a j e , r e s i s t e n c i a e l é c t r i c a , e t c .

#### **N ú m e r o d e p u n t o s d e c o n t r o l .**

E n m u c h o s h o r n o s s e e m p l e a u n s o l o p u n t o d e c o n t r o l d e b i d a m e n t e c o l o c a d o , p u e s t o q u e m á s p u n t o s d e c o n t r o l p o d r í a n c a u s a r c o m p l i c a c i o n e s i n d e s e a b l e s .

#### **C o n t r o l d e l a t e m p e r a t u r a e n f u n c i ó n d e l t i e m p o**

E n l a p r á c t i c a e s r e l a t i v a m e n t e s e n c i l l o e l e x p o n e r u n a s u p e r f i c i e d e l a c a r g a a u n a d e t e r m i n a d a t e m p e r a t u r a c a s i c o n s t a n t e , l o q u e e v i d e n t e m e n t e r e s u l t a m á s c o m p l i c a d o

es determinar el tiempo necesario para alcanzar en la parte más fría de la pieza la temperatura determinada.

Esta operación exige la localización del punto más lento en calentarse, para luego colocar un medidor de temperatura en dicho lugar. La localización del punto más lento en calentarse es en muchas veces una cuestión de suposición. Y usualmente este punto se halla en el interior de la pieza y resulta inaccesible.

Por lo anteriormente expuesto se deduce entonces que es más sencillo y conveniente medir y controlar la temperatura del horno que de las piezas.

Por lo tanto la temperatura en el horno es la temperatura en un transductor de temperatura que puede estar colocado en una de las paredes, el transductor recibe radiación de las paredes, de la carga y de los elementos de calefacción.

Es importante la colocación del instrumento de medición de la temperatura en el horno. Debe colocarse de preferencia cerca de aquel punto de la carga que alcanza más rápidamente las temperaturas finales.

No debe instalarse cerca de los elementos calefactores, ni próximo a una puerta que se abre frecuentemente.

Es importante señalar que la uniformidad de la temperatura dentro de la pieza depende del tiempo que se esté dentro del horno.

### Control programado.

Hasta aquí se ha estudiado solamente el problema de medir y mantener constante la temperatura de la carga.

Después de haber hallado una solución al problema de poner la superficie de la carga a una temperatura determinada y mantenerla constante, el problema de la variación automática de la temperatura, que siga una ley o un ciclo, como es el caso de esta aplicación en particular, no ofrece dificultades insalvables.

La solución más difundida para conseguir que la temperatura siga un ciclo determinado es hacer que una leva accionada por un motor o por un reloj, a través de reductores de velocidad apropiados, mueva el ajuste de control de la temperatura del modo deseado.

En este instrumento puede emplearse rápidamente una nueva relación de transmisión para variar la duración de un ciclo o puede emplearse una nueva leva para cambiar las relaciones de temperatura dentro del ciclo.

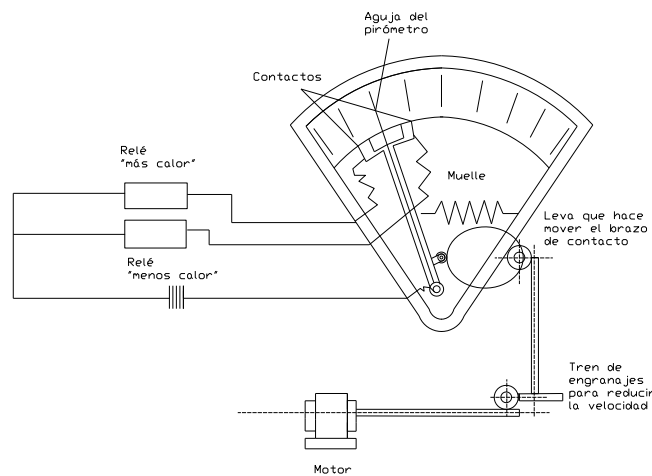


Figura 21. Esquema de control programado



En lugar de la leva puede emplearse un interruptor automático de tiempo, que desconecta el suministro de energía eléctrica después de un cierto tiempo, permitiendo de este modo el enfriamiento de la carga.

Los engranajes y las levas no pueden seleccionarse y diseñarse al azar. Deben adaptarse al tamaño y al material de las piezas que van a calentarse y debe recordarse que la norma ASTM A - 743, recomienda para el material de los álabes móviles de la turbina Francis, un calentamiento muy lento cuando éstos están fríos.

#### **Controlador de temperatura recomendado.**

Se debe recordar que el horno está diseñado para cumplir con los procesos de precalentamiento de los álabes, previo a su reparación por soldadura y el tratamiento térmico de revenido posterior a ella.

En el estudio anterior de éstos procesos se mostró la extrema importancia de la sincronización entre los tiempos y las temperaturas que deben alcanzarse simultáneamente para obtener los resultados que se esperan.

En tal virtud el controlador de temperatura debe ser capaz de regular las rampas o variaciones de la temperatura en función del tiempo transcurrido.

Del catálogo de la firma Watlow, cuya representación en el Ecuador la posee la empresa RETENA S.A., se han extraído los siguientes datos del equipo que se sugiere para cumplir con esta tarea:

Control de Potencia DIN - A - MITE marca Watlow, tipo A. Específicamente el equipo codificado como DA10-24-FO-0200

El mismo que para cumplir con el control necesario que el proceso exige deben emplearse PLC's para añadir al sistema de control la variable tiempo

CIRCUITO DE CONTROL

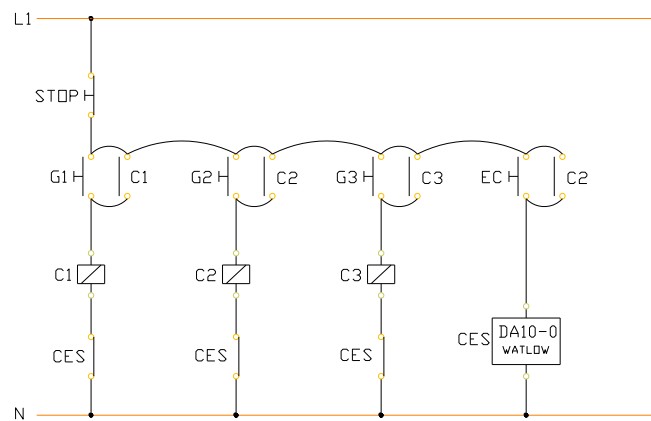


Figura 22. Circuito de Control

### Controladores de potencia

Fabricado en los Estados Unidos de América, la familia de controladores de potencia de estado sólido SCR proporciona control, de calor, el cableado y el tacto de seguridad exterior en un solo paquete.

En el diseño de la unidad de controlador de potencia, se elimina la necesidad de preparación para terminales de cables y determinar las terminaciones adecuadas. Es un paquete completo que se puede instalar con plena confianza.

**Información para pedidos**

El código del elemento para ordenarlo de la fábrica corresponde a:

DIN - A - MITE DA 1 0 - 24 Fo - 0200

**Fase** \_\_\_\_\_

1 = 1 fase, 1 terminal controlador

**Gradiente de Corriente** \_\_\_\_\_

0 = Colección Natural, gradiente de corriente 18 A, 50 °C (122 °F)

**Línea y carga de corriente** \_\_\_\_\_

24 = 100 a 240 V (ac)

**Tipo de Entrada** \_\_\_\_\_

Fo = 4 a 20 mA = (dc) proporcional

**Manual de Lenguaje** \_\_\_\_\_

2 = Español

**Designación de partes del cliente** \_\_\_\_\_

00 = Partes Standard

Es de mucho interés el control de las condiciones internas del horno, en el que se han colocado dos piezas de precisión de vital importancia para el sistema de hidrogenación y además de un alto costo económico.

Partiendo de este punto surge la importancia de seguir en detalle la evolución de este proceso que implica manejar más de una tonelada de masa a una temperatura máxima de 600 °C. En una operación que tomará casi cuatro días.

Los dispositivos de control son rara vez un sustituto de un operador del horno, pero son de gran utilidad en su trabajo.

#### **4.3. Selección de los parámetros de diseño**

La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo y la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene relativamente constante en todo el horno en un instante dado.

Después de un periodo de empapado o mantenimiento a temperatura, se enfría la carga en el interior del horno, juntamente con el revestimiento. Es fundamental, por tanto, el calor almacenado por el revestimiento (durante el calentamiento y empapado) y cedido en el enfriamiento.

Debe aclararse que el concepto de temperatura del horno es bastante convencional. Los elementos calefactores tendrán la mayor temperatura en el sistema.

La carga, incluso al final del periodo de empapado, estará a menor temperatura y, finalmente el revestimiento tendrá, probablemente, una temperatura superior a la de la carga e inferior a la de los elementos calefactores.

El consumo de calor de un proceso en un horno industrial se determina calculando los componentes del balance energético, cuando se trata del diseño de un horno, o midiéndolos en su funcionamiento real, cuando se trata de un horno construido.

La aplicación que a continuación se desarrolla se enfoca en un horno intermitente, debido a que la carga se realiza cada vez que se ha desarrollado un ciclo de calentamiento y enfriamiento por vez.

Entre los componentes de un balance energético se distinguen los que suponen aportación de calor al proceso y los receptores de ese calor:

- Calor perdido a través de las paredes compuestas del horno
- Calor necesario para calentar la masa de los álabes
- Calor que absorberá la vagoneta de carga
- La sumatoria de éstos valores expresarán el consumo calorífico total en el horno

#### **Aportación de calor:**

El calor incorporado procede de resistencias eléctricas montadas en el interior del horno que constituyen los elementos calefactores del sistema de calentamiento, por radiación.

#### **Absorción de calor**

Los receptores de ese calor corresponden a:

- Calor útil (a la carga)
- Calor perdido por las paredes
- Calor perdido por puertas y aberturas

- Calor al contenedor
- Calor cedido al aislamiento térmico
- Otras pérdidas de calor

#### **4.4.Rediseño térmico**

Como ya se demostró en la sección 3.6.3 Aislantes, el flujo de calor hacia el exterior del horno exige la aplicación de un recubrimiento del mismo con un material aislante, de tal modo que en las paredes exteriores se registre una temperatura de operación segura para el personal que labora en esa zona y además se evitaría de esta manera un flujo grande de calor que se traduciría en pérdidas excesivas de calor.

Ahora, el recubrimiento con aislante supone a su vez un recubrimiento para la protección de este material. Por lo tanto se utilizará para este efecto chapa metálica

Manteniendo el criterio de un flujo uniforme de calor a lo largo del circuito térmico, procedemos a analizar cada una de las superficies que componen el horno. Teniendo en cuenta que este análisis se realiza en estado estable desde el interior hacia el exterior.

Para este caso se considerará que el flujo de calor será unidimensional a lo largo del circuito térmico que a su vez incluye el paso a través de las respectivas resistencias térmicas que presentan los ambientes convectivos tanto interno como externo, así como las resistencias que presentan las paredes planas compuestas que constituyen la cámara del horno.

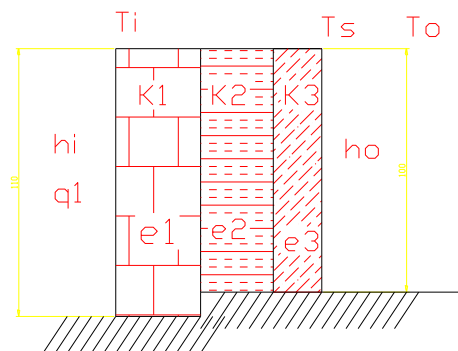
Se supondrán entonces que el sistema está expuesto por un lado a una fuente de calor que provee un medio de alta temperatura, constante y conocida y por el otro a un medio de baja temperatura, constante y conocida también.

Por las pérdidas que pudieran existir en el sellado de la puerta, por el flujo del calor hacia el piso u otras condiciones imprevistas, se decide calentar el horno a una temperatura de  $700^{\circ}$  de este modo se garantiza también que toda la pieza sometida a tratamiento mantenga una distribución uniforme de temperatura, recordando que son necesarios  $600^{\circ}$  para el proceso de revenido.

Es necesario entonces detallar el modelo matemático que regirá el cálculo de la transferencia de calor en cada una de las superficies.

Entonces, a continuación se expone el cálculo de las pérdidas de calor en cada una de las paredes compuestas que forman el horno de tratamientos térmicos.

**Pared lateral derecha.**



**Figura 23. Pared lateral derecha**

Partiendo del principio de que la rapidez del flujo de calor a través de una serie de paredes planas viene dada por la expresión:

$$q = \frac{T_i - T_o}{\sum R}$$

Se consideran los siguientes datos:

$q$  = Flujo de calor por conducción en Btu/h

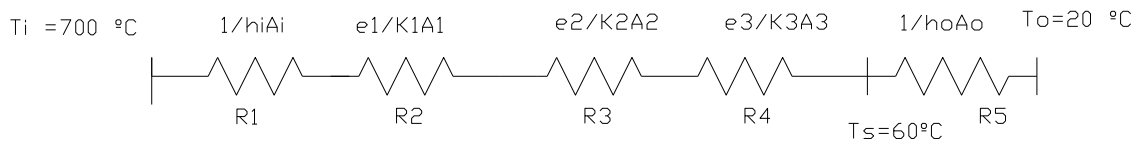
$T_o$  = Temperatura ambiente en el taller en °F

$T_s$  = Temperatura exterior en la pared del horno en °F

$T_i$  = Temperatura en el interior del horno en °F

$R$  = Resistencia térmicas existentes en Btu/h\* °F

Analizamos entonces el circuito térmico correspondiente a esta sección de la construcción:



**Figura 24: Circuito térmico de la pared derecha**

Dónde:

$R_1$  = Resistencia térmica por el ambiente convectivo interior

$R_2$  = Resistencia térmica en la pared de ladrillo refractario

$R_3$  = Resistencia térmica en el aislamiento térmico

$R_4$  = Resistencia térmica en la chapa metálica

$R_5$  = Resistencia térmica por el ambiente convectivo exterior



Procedemos a desglosar una a una éstas resistencias térmicas. Entonces para cada una de ellas obtenemos las siguientes expresiones:

$$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i}$$

En dónde:

$h_i$  = Coeficiente convectivo para el interior del horno en Btu/h\*pie<sup>2</sup> °F

$A_i$  = Área interior de la pared en pie<sup>2</sup>

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A_1}$$

Dónde:

$e_1$  = Espesor de la pared de ladrillos refractarios en pie

$k_1$  = El coeficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario en Btu/h pie °F

$A_1$  = Área de transferencia de calor para la pared de ladrillo en pie<sup>2</sup>

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A_2}$$

Dónde:

$e_2$  = Espesor del recubrimiento de lana de vidrio en pie

$k_2$  = El coeficiente de conductividad térmica del material aislante en Btu/h pie °F

$A_2$  = Área de transferencia de calor para el aislante en pie<sup>2</sup>

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A_3}$$

Dónde:

$e_3$  = Espesor del recubrimiento del recubrimiento metálico en pie

$k_3$  = El coeficiente de conductividad térmica de la chapa de acero en Btu/h pie °F

$A_3$  = Área de transferencia de calor para la chapa de acero en pie<sup>2</sup>

$$R_5 = \frac{1}{h_o * A_o}$$

D ó n d e :

$h_o$  = Coeficiente convectivo para el exterior del horno en  $Btu/h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F$

$A_o$  = Área exterior de la pared de la pared en  $pie^2$ .

A h o r a p r o c e d e m o s a a s i g n a r l o s v a l o r e s c o r r e s p o n d i e n t e s a l a s v a r i a b l e s a n t e r i o r m e n t e e x p u e s t a s .

$$T_o = 20 \text{ } ^\circ C = 68 \text{ } ^\circ F$$

$$T_s = 60 \text{ } ^\circ C = 140 \text{ } ^\circ F$$

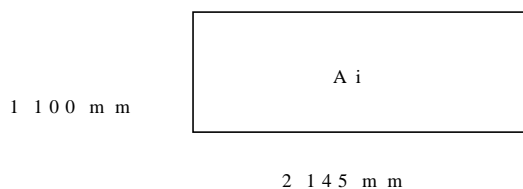
$$T_i = 700 \text{ } ^\circ C = 1292 \text{ } ^\circ F$$

D e l a m i s m a m a n e r a q u e s e r e a l i z ó e l c á l c u l o p a r a d e t e r m i n a r l a n e c e s i d a d d e a i s l a m i e n t o t é r m i c o e n l a s p a r e d e s d e l h o r n o , a s u m i m o s t a m b i é n l o s c o e f i c i e n t e s c o n v e c t i v o s , t a n t o p a r a e l i n t e r i o r c o m o p a r a e l e x t e r i o r , s e a s i g n a n l o s v a l o r e s q u e s i g u e n a c o n t i n u a c i ó n :

$$h_i = 2 \text{ } Btu/h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F$$

$$h_o = 1,5 \text{ } Btu/h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F$$

A h o r a , p r o c e d e m o s a d e t e r m i n a r l a s á r e a s d e t r a n s f e r e n c i a d e c a l o r p a r a c a d a u n o d e l o s e l e m e n t o s d e l a p a r e d c o m p u e s t a .

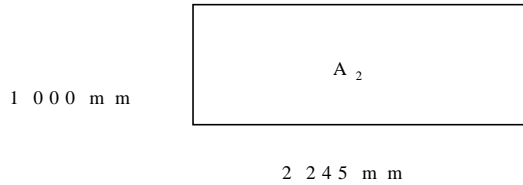


**Figura 25. Superficie derecha A i**

$$A_i = 2,3595 \text{ } m^2$$

$$A_i = A_1$$

$$A_1 = 2,3595 \text{ m}^2$$



**Figura 26. Superficie derecha  $A_2$**

$$A_2 = 2,245 \text{ m}^2$$

$$A_2 = A_3 = A_o$$

$$A_2 = 2,245 \text{ m}^2$$

Como ya se mencionó anteriormente es necesario transformar éstas superficies a unidades coherentes para el modelo matemático utilizado.

Entonces se tiene:

$$A_i = A_1 = 25,38 \text{ pie}^2$$

$$A_2 = A_3 = A_o = 24,15 \text{ pie}^2$$

Ahora es momento de definir las conductividades térmicas para cada material de la pared compuesta.

$k_1 = 0,58 \text{ Btu/ h pie } ^\circ\text{F}$  (tomado de la tabla 3 CHAPTER 36 PHYSICLA PROPERTIES OF MATERIALS)

$k_2 = 0,04314 \text{ Kcal/ h m } ^\circ\text{C}$  (tomado de Gavidia - Cabay)

$k_3 = 46,12 \text{ Kcal/ h m } ^\circ\text{C}$  (tomado de Gavidia - Cabay) (Chapa de acero UNI 3144

AI SI C 10 - 20 de 1/16 pulg de espesor)

En unidades coherentes se tiene:

$$k_1 = 0,58 \quad \text{Btu/h pie } ^\circ\text{F}$$

$$k_2 = 0,029 \quad \text{Btu/h pie } ^\circ\text{F}$$

$$k_3 = 31 \quad \text{Btu/h pie } ^\circ\text{F}$$

Los distintos espesores de los materiales que componen la pared lateral son de vital importancia para el cálculo de la transferencia de calor, a continuación se definen sus valores.

$$e_1 = 100 \text{ mm} = 0.328 \text{ pie}$$

$$e_2 = \text{Incógnita (Por definir el espesor mínimo de aislamiento)}$$

$$e_3 = 1/16 \text{ " } = 1,5 \times 10^{-3} \text{ pie}$$

En vista que el espesor del aislamiento es una incógnita, para determinarlo se procede a realizar el análisis del flujo del calor en dos partes del mismo circuito, manteniendo el criterio de que el flujo de calor será constante a lo largo de este circuito térmico en serie.

Entonces se fija los límites de frontera para el análisis:

1. Desde  $T_i$  hasta  $T_s$
2. Desde  $T_s$  hasta  $T_o$

De esta manera se tiene dos expresiones para un mismo flujo de calor el cual también es desconocido.

$$q_1 = \frac{T_i - T_s}{\frac{1}{hiA_i} + \frac{e_1}{k_1A_1} + \frac{e_2}{k_2A_2} + \frac{e_3}{k_3A_3}}$$

Y

$$q_1' = \frac{Ts - To}{\frac{1}{hoAo}}$$

Reemplazando valores en las expresiones se tiene:

$$q_1 = \frac{1292^\circ F - 140^\circ F}{\frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 25,38 pie^2} + \frac{0,328 pie}{0,58 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,38 pie^2} + \frac{e_2}{0,029 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 24,15 pie^2} + \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,15 pie^2}}$$

$$q_1 = \frac{1152^\circ F}{0,04198 \frac{Btu}{h^\circ F} + 1,42785 e_2 \frac{Btu * pie}{h^\circ F}}$$

Ahora se puede calcular directamente el flujo de calor en la pared lateral derecha si se

incluyen los valores en la siguiente expresión:

$$q_1' = \frac{140^\circ F - 68^\circ F}{\frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 24,15 pie^2}}$$

$$q_1' = 2608,2 \frac{Btu}{h}$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo de todo el circuito térmico ambas

ecuaciones pueden igualarse.

$$q_1' = q_1$$

$$2608,2 \frac{Btu}{h} = \frac{1152^\circ F}{0,04198 \frac{Btu}{h^\circ F} + 1,42785e_2 \frac{Btu * pie}{h^\circ F}}$$

$$e_2 = 0,2799 \text{ pie}$$

En conclusión se necesitará un espesor mínimo de  $e_2 = 8,53 \text{ cm}$  de lana de vidrio adosada a la pared para garantizar una temperatura de operación segura en el exterior del horno.

Se asume entonces un aislamiento térmico con lana de vidrio  $e_2 = 10 \text{ cm}$  como recubrimiento en todas las superficies del horno

O lo que es lo mismo:

$$e_2 = 4 \text{ plg} = 0,3333 \text{ pie.}$$

Con este valor del espesor se procede a realizar un recálculo del flujo de calor a través de la pared lateral derecha del horno.

$$q_1 = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

Y

$$q_1 = \frac{T_s - T_o}{\frac{1}{hoAo}}$$

Reemplazando valores en las expresiones se tiene:

$$q_1 = \frac{1292^\circ F - 68^\circ F}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

Dónde:

$$R_1 = \frac{1}{hiA_i} = \frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 25,38 pie^2}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 A_1} = \frac{0,328 pie}{0,58 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,38 pie^2}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 A_2} = \frac{0,333 pie}{0,029 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 24,15 pie^2}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 A_3} = \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,15 pie^2}$$

$$R_5 = \frac{1}{hoA_o} = \frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 24,15 pie^2}$$

Entonces se obtiene que:

$$q_1 = 2249,12 \frac{Btu}{h}$$

Ahora que se conoce el flujo de calor en la pared lateral derecha si se incluyen los valores en la siguiente expresión, se puede conocer la temperatura en la pared exterior del horno con el espesor definitivo del aislante aplicado.

$$q_1' = \frac{T_s - 68^\circ F}{\frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 24,15 pie^2}}$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo de todo el circuito térmico ambas ecuaciones pueden igualarse.

$$q_1' = q_1$$

$$2249,12 \frac{Btu}{h} = \frac{T_s - 68^\circ F}{1} \cdot \frac{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \cdot ^\circ F} * 24,15 pie^2}{1}$$

$$T_s = 130 \text{ } ^\circ F = 54,49 \text{ } ^\circ C$$

### Pared lateral izquierda

Como las condiciones en esta pared son idénticas a la analizada anteriormente se realiza un breve cálculo para comprobar los resultados obtenidos.

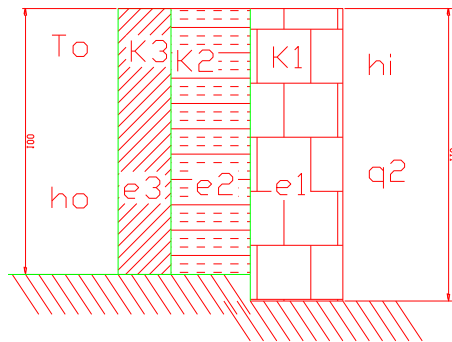


Figura 27. Pared lateral izquierda

En este análisis se considera como límites de frontera la temperatura inicial del horno y directamente la temperatura ambiente en el taller.

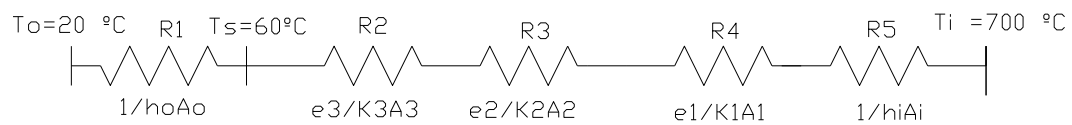


Figura 28. Circuito térmico de la pared izquierda

$$q_2 = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$



$$q_2 = \frac{1292^\circ F - 68^\circ F}{\frac{1}{hiAi} + \frac{e_1}{k_1A_1} + \frac{e_2}{k_2A_2} + \frac{e_3}{k_3A_3} + \frac{1}{hoAo}}$$

Reemplazando valores en las expresiones se tiene:

$$q_2 = \frac{1292^\circ F - 68^\circ F}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

D ó n d e:

$$R_1 = \frac{1}{hiAi} = \frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 25,38 pie^2}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1A_1} = \frac{0,328 pie}{0,58 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,38 pie^2}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2A_2} = \frac{0,333 pie}{0,029 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 24,15 pie^2}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3A_3} = \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25,15 pie^2}$$

$$R_5 = \frac{1}{hoAo} = \frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 24,15 pie^2}$$

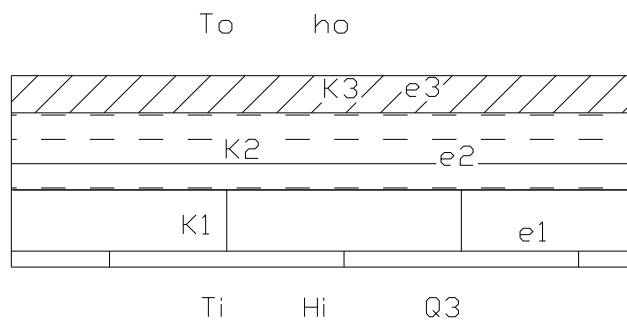
Entonces se obtiene que:

$$q_2 = 2233,12 \frac{Btu}{h}$$

Como puede verse en éstos resultados el flujo de calor  $q_1$  y  $q_2$  prácticamente coinciden, por lo tanto se demuestra que el flujo de calor es el mismo en las paredes del horno hacia el exterior.

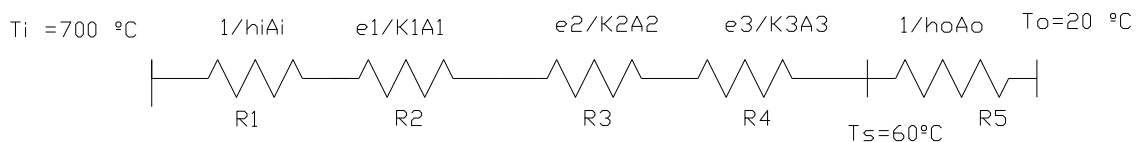
**Cálculo de calor del flujo de calor en el techo.**

Se ha mencionado anteriormente que una de las modificaciones del horno actual, será reemplazar el techo del mismo por una loza de ladrillos refractarios, recubierto con lana de vidrio y la respectiva cubierta metálica, con el propósito de disminuir las posibles pérdidas de calor a través de esta zona, en tal virtud y con la debida aclaración se procede a realizar el cálculo del calor que se pierde a través de un techo en las nuevas condiciones.

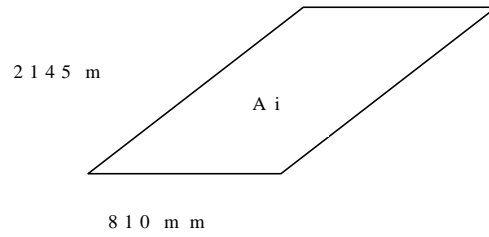


**Figura 29. Techo**

Manteniendo los mismos datos iniciales de temperaturas y conductividades térmicas de los materiales, se procede a calcular las áreas que intervienen en el análisis.



**Figura 30. Circuito térmico del techo**

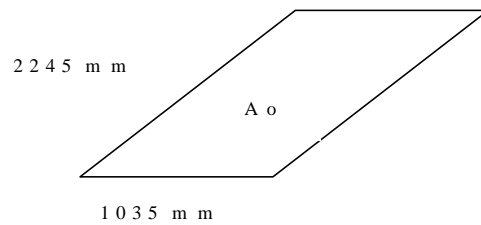


**Figura 31. Superficie en el techo  $A_i$**

$$A_i = 1,73745\text{ m}^2$$

$$A_i = A_1$$

$$A_1 = 1,73745\text{ m}^2$$



**Figura 32. Superficie en el techo  $A_o$**

$$A_o = 2,3235\text{ m}^2$$

$$A_o = A_2 = A_3$$

$$A_2 = A_3 = 2,3235\text{ m}^2$$

Es necesario transformar éstas superficies a unidades coherentes con el sistema empleado en el modelo matemático.

$$A_i = A_1 = 18,69\text{ pie}^2$$

$$A_o = A_2 = A_3 = 25\text{ pie}^2$$

De la misma manera que se realizó el cálculo en las paredes laterales, se procede a definir los espesores de la loza de ladrillo refractario, el espesor del aislamiento térmico y la chapa metálica que recubrirán el techo.

$$e_1 = 0.328 \text{ pie}$$

$$e_2 = 0.333 \text{ pie}$$

$$e_3 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ pie}$$

Se plantea entonces las dos expresiones necesarias para calcular el flujo de calor constante en el circuito y la temperatura exterior desconocida ( $T_s$ ). Los límites de frontera se dividen en la superficie exterior de la loza.

$$q_3 = \frac{Ti - To}{\frac{1}{hiAi} + \frac{e_1}{k_1A_1} + \frac{e_2}{k_2A_2} + \frac{e_3}{k_3A_3} + \frac{1}{hoAo}}$$

Y

$$q_3 = \frac{Ts - To}{\frac{1}{hoAo}}$$

Reemplazando valores en las expresiones se tiene:

$$q_3 = \frac{1292^\circ F - 68^\circ F}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

D ó n d e :

$$R_1 = \frac{1}{hiAi} = \frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 18,69 pie^2}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1A_1} = \frac{0,328 pie}{0,58 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 18,69 pie^2}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2A_2} = \frac{0.333 pie}{0.029 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 25 pie^2}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 A_3} = \frac{5,2 \times 10^{-3} \text{ pie}}{31 \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^\circ \text{F}} * 25 \text{ pie}^2}$$

$$R_5 = \frac{1}{hoAo} = \frac{1}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^2 \circ \text{F}} * 25 \text{ pie}^2}$$

Entonces se obtiene que:

$$q_3 = 2254,66 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Se sabe que la temperatura en el exterior del techo del horno puede calcularse reemplazando los datos en la siguiente ecuación:

$$q'_3 = \frac{Ts - 68^\circ \text{F}}{1} \frac{1}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^2 \circ \text{F}} * 25 \text{ pie}^2}$$

Como el flujo de calor es el mismo a lo largo de todo el circuito térmico ambas ecuaciones pueden igualarse.

$$q'_3 = q_3$$

$$2254,66 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = \frac{Ts - 68^\circ \text{F}}{1} \frac{1}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h pie}^2 \circ \text{F}} * 25 \text{ pie}^2}$$

$$Ts = 128,12 \text{ }^\circ \text{F}$$

$$Ts = 53,4 \text{ }^\circ \text{C}$$

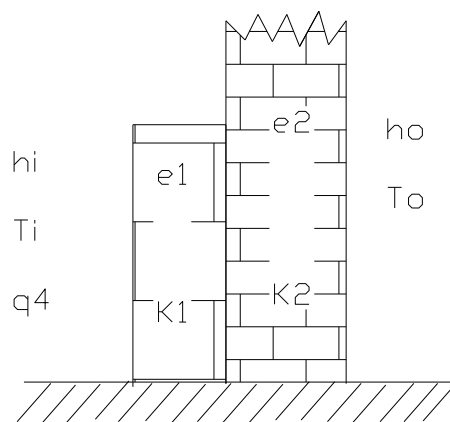
#### Cálculo del flujo del calor en la pared posterior del horno.

El detalle particular de esta superficie de transferencia de calor es que esta pared se encuentra en contacto directo con la pared de la nave industrial donde funciona el taller.

Por lo tanto se debe considerar el coeficiente de conductividad térmica del ladrillo común de construcción empleado en la pared del taller. Y como esta pared da al exterior de la planta la temperatura ambiente final será de 18 °C.

Por otra parte es importante señalar que la temperatura que se alcance en este lado expuesto, podría representar peligro para el personal de la planta, ya que da a una zona que aunque no es transitada por tratarse de un depósito de materiales dados de baja, de resultar un valor alto se debería pensar en un sistema de protección

Sin embargo también hay que considerar en el diseño que esta pared, que al no contar con aislamiento térmico podría convertirse en un sumidero de calor.



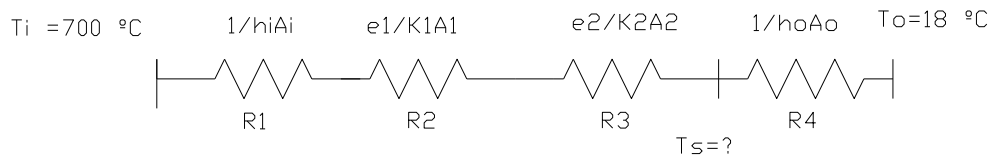
**Figura 33. Pared posterior**

Para el análisis de transferencia de calor en la pared posterior, se consideran las siguientes temperaturas:

$$T_o = 18 \text{ °C} = 64,4 \text{ °F}$$

$$T_s = \text{Desconocida}$$

$$T_i = 700 \text{ °C} = 1292 \text{ °F}$$



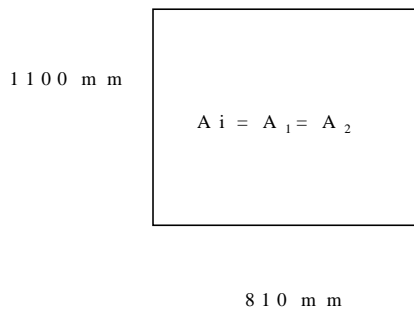
**Figura 34. Circuito térmico de la pared posterior**

Como ya es sabido se asumen los coeficientes de convección para el interior y el exterior de la cámara del horno.

$$h_i = 2 \text{ Btu/h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{°F}$$

$$h_o = 1,5 \text{ Btu/h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{°F}$$

A continuación se realiza el cálculo de las áreas que intervienen en el flujo de calor.



**Figura 35. Superficie de la pared posterior**

$$A_i = 0.891 \text{ m}^2$$

$$A_i = A_1 = A_2$$

$$A_i = A_1 = A_2 = 9.587 \text{ pie}^2$$

Ya se conoce el valor del coeficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario, en tanto que se considerará:

$k_2$  = Coeficiente de conductividad térmica del ladrillo de construcción, ya conocido.

$$k_2 = 0,72 \text{ W/m} \cdot \text{°K}$$

Que en unidades coherentes se traduce a:

$$k_2 = 0.416 \frac{Btu}{hft^\circ F}$$

Los espesores de los elementos de la pared compuesta son los siguientes:

$e_1$  = espesor de la pared de ladrillo refractario

$e_2$  = espesor de la pared de ladrillo común para construcción.

El espesor  $e_1$  del refractario se mantiene en 0.328 pie, mientras que:

$$e_2 = 135 \text{ mm} = 0.4429 \text{ pie}$$

$e_2$  Entonces se plantea las respectivas ecuaciones con los debidos criterios que ya se conocen.

$$q_4 = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{hiA_i} + \frac{e_1}{k_1A_1} + \frac{e_2}{k_2A_2} + \frac{1}{hoA_o}}$$

$$q_4 = \frac{1292^\circ F - 64.4^\circ F}{\frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2^\circ F} * 9.587 pie^2} + \frac{0.328 pie}{0.58 \frac{Btu}{hpie^\circ F} * 9.587 pie^2} + \frac{0.4429 pie}{0.416 \frac{Btu}{hpie^\circ F} * 9.587 pie^2} + \frac{1}{1.5 \frac{Btu}{hpie^2^\circ F} * 9.587 pie^2}}$$

$$q_4 = 4210.04 \frac{Btu}{h}$$

Asumiendo este valor como el flujo de calor a través de la pared posterior, se puede calcular la temperatura en la pared exterior del taller.

$$q_4 = \frac{T_s - T_o}{\frac{1}{hoA_o}}$$



$$q_4' = \frac{Ts - 64,4^\circ F}{1} \\ 1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 9,587 pie^2$$

$$q_4' = \frac{Ts - 64,4^\circ F}{0,0695 \frac{Btu}{h^\circ F}}$$

Como se considera que:

$$q_4' = q_4$$

Entonces se tiene que:

$$\frac{Ts - 64,4^\circ F}{0,0695 \frac{Btu}{h^\circ F}} = 4210,04 \frac{Btu}{h}$$

$$Ts = 356,99^\circ F = 180,55^\circ C$$

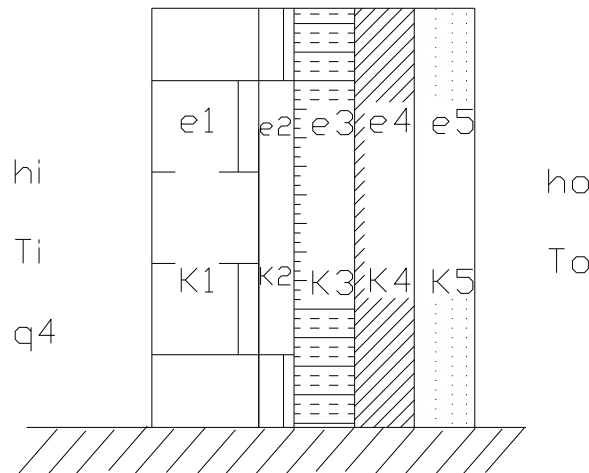
Como se puede apreciar, la temperatura en el exterior de la pared posterior del horno es extremadamente alta, y por lo tanto constituye un peligro para el personal que labora en la planta por tratarse de un riesgo latente de inicio de incendios si se almacenan cerca algunos materiales combustibles.

Al considerar los factores anteriormente expuestos se hace evidente la necesidad de elegir algunas alternativas en el diseño que ayuden a disminuir el riesgo que representa la elevada temperatura en esta parte del horno.

Como ya se mencionó anteriormente la pared posterior del horno se encuentra directamente en contacto con la pared de ladrillo que conforma la nave industrial donde funciona el taller mecánico.

Entonces frente a la necesidad de disminuir la temperatura en la pared exterior del taller se decide picar la misma en la zona de contacto con el horno para instalar ahí una capa de lana de vidrio protegida por una malla metálica (tela de aluminio) que permita recubrir la zona con un emplasto de cemento y arena para el enlucido de la pared, manteniendo así la estética en la parte exterior de la pared.

1. pared de ladrillo refractario
2. espesor de ladrillo común
3. lana de vidrio
4. Tela de aluminio
5. emplasto de cemento y arena para el enlucido.



**Figura 36. Pared posterior modificada**

Para garantizar que al picar la pared de ladrillo común no se dañe a la pared de ladrillo refractario, se recomienda picar hasta una profundidad de 85 mm, lo que dejaría 50 mm de pared de ladrillo común antes de tomar contacto con el refractario.

Entonces se obtienen los siguientes espesores de cada uno de los elementos de la pared compuesta.

Espesor del ladrillo refractario

$$e_1 = 0,328 \text{ pie}$$

Espesor del ladrillo común

$$e_2 = 50 \text{ mm}$$

$$e_2 = 0,164 \text{ pie}$$

Espesor del aislamiento con lana de vidrio

$$e_3 = 80 \text{ mm}$$

$$e_3 = 0,262 \text{ pie}$$

Espesor de la malla metálica

Se desprecia por que se supone tiene un alto coeficiente de conductividad térmica y un muy bajo espesor, por lo tanto no debería presentar mayor resistencia térmica.

Espesor del emplaste de cemento y arena

$$e_4 = 5 \text{ mm} = 0,016 \text{ pie}$$

Manteniendo los datos iniciales de área de transferencia de calor  $A_i$ , los coeficiente convectivos ( $h_i$  y  $h_o$ ) y de temperaturas tanto iniciales como finales ( $T_i$  y  $T_o$ ). Sólo resta definir el coeficiente de conductividad térmica del emplasto.

$k_4$  = Coeficiente de conductividad térmica del emplasto

$$k_4 = 0,416 \text{ Btu/hpie}^\circ\text{F.}$$

Se recuerda que el coeficiente de conductividad térmica de la lana de vidrio es:

$$k_3 = 0,029 \text{ Btu/hpie}^\circ\text{F}.$$

Ahora se realiza el recálculo con las expresiones ya establecidas:

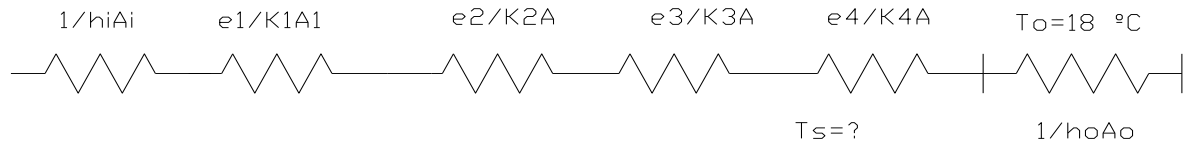


Figura 37. Circuito térmico de la pared posterior modificada

$$q_4 = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{hiAi} + \frac{e_1}{k_1Ai} + \frac{e_2}{k_2Ai} + \frac{e_3}{k_3Ai} + \frac{e_4}{k_4Ai} + \frac{1}{hoAo}}$$

En la que reemplazando los datos estipulados se obtiene entonces:

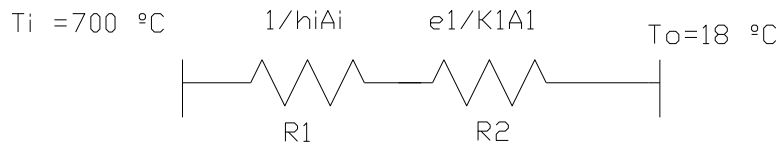


Figura 38. Circuito térmico hacia el exterior del taller

Reemplazando valores en las expresiones se tiene:

$$q_4 = \frac{1292^\circ F - 64,4^\circ F}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6}$$

Dónde:

$$R_1 = \frac{1}{hiAi} = \frac{1}{2 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^2 \circ\text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 A_1} = \frac{0,328 \text{ pie}}{0,58 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^\circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 A_i} = \frac{0,164 \text{ pie}}{0,416 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^\circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 A_i} = \frac{0,262 \text{ pie}}{0,029 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^\circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$R_5 = \frac{e_3}{k_4 A_i} = \frac{0,016 \text{ pie}}{0,416 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^\circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$R_6 = \frac{1}{hoAo} = \frac{1}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^2 \circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}$$

$$q_4 = 1051,145 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Asumiendo este valor como el flujo de calor a través de la pared posterior, se puede calcular la temperatura en la pared exterior del taller.

$$\dot{q}_4 = \frac{T_s - T_o}{\frac{1}{hoAo}}$$

$$\dot{q}_4 = \frac{T_s - 64,4^\circ \text{F}}{\frac{1}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{hpie}^2 \circ \text{F}} * 9,587 \text{ pie}^2}}$$

$$\dot{q}_4 = \frac{T_s - 64,4^\circ \text{F}}{0,0695 \frac{\text{Btu}}{\text{h}^\circ \text{F}}}$$

Como se considera que:

$$\dot{q}_4 = q_4$$

Entonces se tiene que:

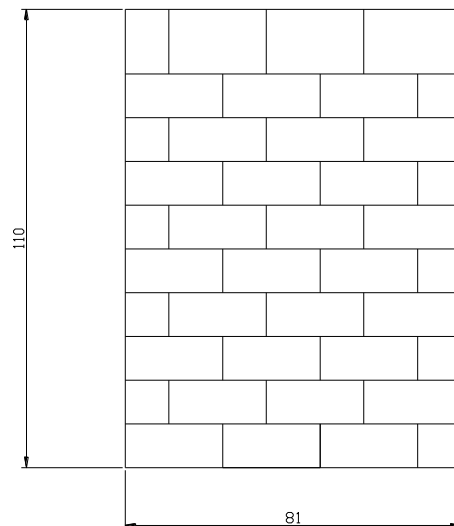
$$\frac{T_s - 64,4^\circ F}{0,0695 \frac{Btu}{h^\circ F}} = 1051,145 \frac{Btu}{h}$$

$$T_s = 137,49^\circ F = 58^\circ C.$$

Este valor que se obtiene para la temperatura en el exterior de la pared del taller será considerada como segura, además que, como puede apreciarse las medidas que se tomaron se traducen también en una notable disminución de las pérdidas de calor a través de esta zona del horno, por lo que el flujo de calor es bastante más bajo.

**Flujo de calor en la puerta del horno.**

**Cálculo del peso aproximado de la puerta**



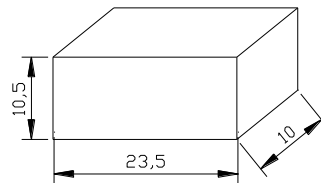
**Figura 39. Dimensiones de la puerta construida con ladrillos refractarios**

Tomando una muestra de este ladrillo, se determinó su densidad a partir de sus dimensiones geométricas y su peso.

**Peso del ladrillo refractario:** 4,3 Kg = 9,4815 lb

**Dimensiones del ladrillo:** (10 x 10,5 x 23,5) cm .

**Volumen del ladrillo:** 2467,5 cm<sup>3</sup>



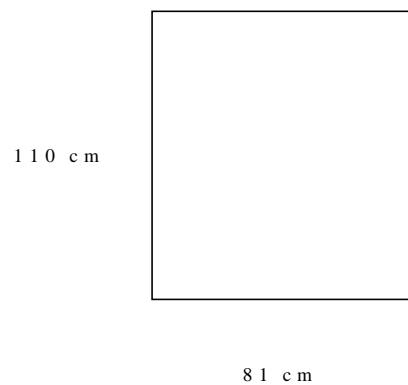
**Figura 40. Dimensiones del ladrillo refractario**

Entonces su superficie útil será:

$$Sup_{lad} = 10,5cm^2 * 23,5cm^2$$

$$Sup_{lad} = 246,75cm^2$$

Se sabe también que el área de la puerta es:



**Figura 41. Superficie de la puerta (a)**

Entonces el área de la puerta resulta:

$$Sup_{puerta} = 8910 cm^2$$

Con esta información se procede a calcular el número de ladrillos necesarios para construir la puerta.

$$Num_{lad} = \frac{Sup_{puerta}}{Sup_{lad}} = \frac{8910cm^2}{246,75cm^2}$$
$$Num_{lad} = 36,1ladrillos$$

Entonces se deduce que el peso de la puerta de ladrillo será:

$$Peso_{puerta} = Cantidad\ de\ ladrillos * Peso\ de\ cada\ ladrillo$$

$$Peso_{puerta} = 36,1\ ladrillos * 4,3\ Kg$$

Es necesario aumentar al menos un 20 % del peso para incluir el marco metálico de la puerta, lo que resulta.

$$Peso_{puerta} = 155,23\ Kg * 1,2 = 186,272\ Kg$$

En tal virtud puede apreciarse que el peso de la puerta sería considerable y requeriría un diseño especial de la misma, que incluya un sistema de izaje capaz de soportarla y asegurarla, éste problema sólo aumentaría el coste del mismo, por lo tanto, se sugiere que se conserve la configuración actual de la puerta del horno, siendo ésta un relleno de fibra de cerámica refractaria, y manteniendo de esta manera el sistema de cierre sostenido por bisagras.

Entonces se procede a rediseñar la puerta con el nuevo material sugerido, con el propósito de disminuir el peso de la misma. Obviamente esta modificación implicará una ligera variación en el cálculo del flujo de calor en todo el sistema, antes calculado.

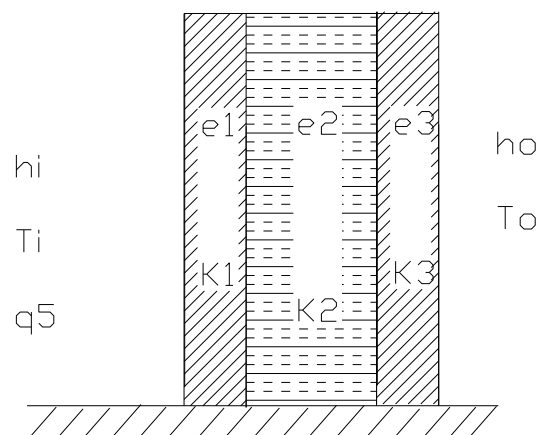
Se decide realizar un rediseño térmico de la puerta del horno en función del peso que alcanzaría la misma si se construyera de ladrillo refractario, lo que complicaría innecesariamente el sistema, pues se deberían diseñar adicionalmente mecanismos que



faciliten el levantamiento de la misma y su aseguramiento, tal vez por medios hidráulicos, esto aumentaría considerablemente el costo del equipo.

Se sugiere entonces el relleno de la puerta con un material refractario capaz de soportar las altas temperaturas que el proceso de revenido exige, y a la vez sea lo suficientemente liviano para asegurar un cierre hermético y sencillo.

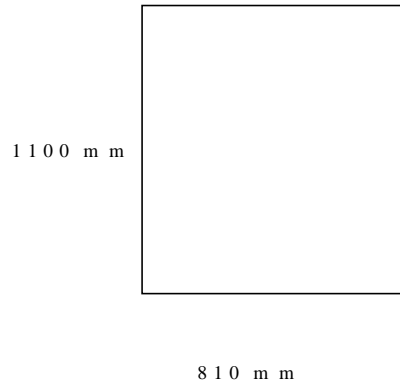
Por las razones antes expuestas se decide construir la puerta de tal modo que se sea un conjunto resistente a la temperatura a la que se verá expuesta y a la vez liviana para una fácil manipulación de la misma, por lo tanto se realiza el cálculo considerándola como un relleno de fibra cerámica refractaria entre dos caras de chapa metálica.



**Figura 42. Esquema de la puerta modificada**

A continuación se procede a calcular el peso de la puerta con el nuevo material de relleno y verificar si existe diferencia con el peso de la alternativa inicial.

Debe tenerse presente las dimensiones de la puerta:



**Figura 43. Superficie de la puerta (b)**

Con una superficie de:

$$A = 0.891 \text{ m}^2 = 9,587 \text{ pie}^2$$

El espesor calculado de fibra cerámica refractaria es de:

$$e_{\text{fibra cerámica}} = 0,528 \text{ pie}$$

Lo que resulta en un volumen total del relleno de fibra cerámica refractaria de:

$$Vol = 5,06 \text{ pie}^3$$

Por el proveedor de este tipo de producto se sabe que la densidad de éste material es de:

$$\partial = 8 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

Entonces con esta información es sencillo calcular la masa total de fibra cerámica, si se

recuerda que:

$$\partial = \frac{m}{vol}$$

$$\partial * vol = m$$

$$8 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} * 5,06 \text{ pie}^3 = m$$

$$m = 40,48 \text{ lb}$$

O lo que es lo mismo:

$$m = 18,4 \text{ Kg.}$$

Comparando este resultado del nuevo peso de la puerta, se comprueba que utilizando fibra cerámica refractaria se reduce en un 88 % el peso de la misma, que si se utilizara ladrillo refractario. Esta considerable disminución de peso se traduce en una simplificación del diseño de la puerta, de esta manera se mantiene entonces la configuración original de la misma.

Se mantienen los mismos valores para los coeficientes de conductividad para los elementos de esta pared compuesta.

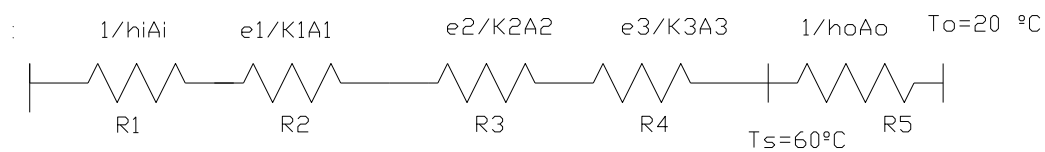
Los espesores de la chapa metálica se mantienen constantes, mientras que el espesor del aislamiento térmico de fibra cerámica deberá ser calculado, siendo:

$e_2$  = Espesor del aislamiento con fibra cerámica

$e_2$  = Incógnita

Además es necesario fijar el coeficiente de conductividad térmica de la fibra cerámica refractaria que a 700 °C en promedio toma el valor de

$K_2 = 0,144 \text{ Btu/pie}^2\text{h}^\circ\text{F}$



**Figura 44. Circuito térmico de la puerta modificada**

Tomamos la información que nos pueden ofrecer las dos ecuaciones que nos provee el circuito térmico en serie:

$$q_5 = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{e_1}{k_1 A_1} + \frac{e_2}{k_2 A_2} + \frac{e_3}{k_3 A_3} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Y

$$q_5 = \frac{T_s - T_o}{\frac{1}{hoAo}}$$

En las mismas que luego de ingresar los valores se obtiene:

$$q_5 = \frac{1292^\circ F - 68^\circ F}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}$$

D ó n d e :

$$R_1 = \frac{1}{hiAi} = \frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 A_1} = \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 A_i} = \frac{e_2}{0,144 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 A_i} = \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$R_5 = \frac{1}{hoAo} = \frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$q_5 = \frac{1224^\circ F}{0,1215 \frac{Btu}{h^\circ F} + \frac{e_2}{1,3805 \frac{Btu}{h^\circ F} pie}}$$

En tanto que analizando la segunda ecuación para el mismo flujo de calor y asumiendo

una temperatura en el exterior de la puerta del horno de 60 °C se obtiene:

$$q'_5 = \frac{140^\circ F - 68^\circ F}{1} \cdot \frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 9,587 pie^2}$$

$$q'_5 = 1035,39 \frac{Btu}{h}$$

Igualando éstas dos ecuaciones

$$q'_5 = q_5$$

$$1035,39 \frac{Btu}{h} = \frac{1224^\circ F}{0,1215 \frac{Btu}{h^\circ F} + 0,7243e_2 \frac{Btupie}{h^\circ F}}$$

$$e_2 = 1,428 pie = 43cm$$

Como puede verificarse este valor del espesor resultará en una puerta muy robusta, por lo que se plantea, colocar una capa de lana de vidrio a continuación de la fibra cerámica refractaria, con el propósito de reducir el espesor de la puerta entonces debe añadirse al circuito térmico la resistencia producida por este aislamiento térmico.

En primer lugar es necesario determinar el espesor mínimo necesario de la fibra cerámica refractaria, sabiendo por información del fabricante que la temperatura máxima de servicio del aislamiento de lana de vidrio es de 450 °C (842 °F), como ésta capa estará en contacto directo con la otra cara de la fibra cerámica se debe poner especial atención a este parámetro.

Como ya se calculó el flujo de calor entonces analizamos el circuito térmico hasta este punto con los límites de frontera que ya han sido explicados.

Entonces se tiene:

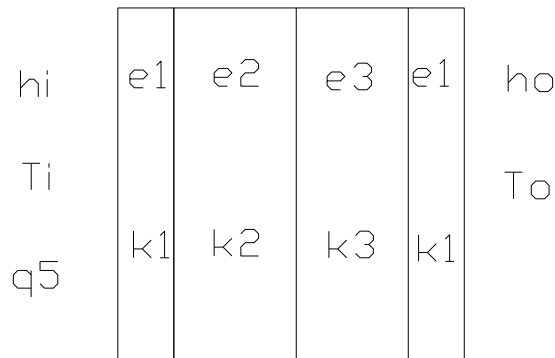
$$q_s = \frac{1292^\circ F - 842^\circ F}{\frac{1}{2 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 9,587 pie^2} + \frac{5,2 \times 10^{-3} pie}{31 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 9,587 pie^2} + \frac{e_{fibracerámica}}{0,144 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 9,587 pie^2}} = 1035,39 \frac{Btu}{h}$$

$$e_{fibracerámica} = 0,528 pie = 16,1cm$$

Con este espesor mínimo de fibra de cerámica refractaria, se garantiza el correcto funcionamiento de la capa de aislante de lana de vidrio, cuyo espesor se procede a calcular a continuación:

$$1035,39 \frac{Btu}{h} = \frac{1224^\circ F}{0,052 \frac{^\circ Fh}{Btu} + 1,749 \times 10^{-5} \frac{^\circ Fh}{Btu} + 0,382 \frac{^\circ Fh}{Btu} + 3,59 e_{vidrio} \frac{^\circ Fh}{Btu} + 1,74 \frac{^\circ Fh}{Btu} + 0,069 \frac{^\circ Fh}{Btu}}$$

$$e_{lanadevidrio} = 0,189 pie = 5,76cm$$



**Figura 45. Configuración del relleno de la puerta del horno**

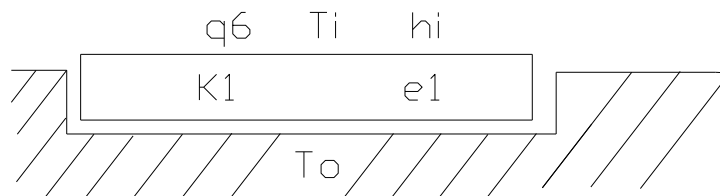
Entonces el relleno de fibra cerámica ( $e_1$ ) y lana de vidrio ( $e_2$ ) estarán contenidas en un marco construido a partir de perfiles U, y ambas caras estarán protegidas por tapas de chapa metálica ( $e_1$ ).

Los perfiles empleados para el marco según el catálogo de Indumet corresponden al de las dimensiones 250 x 80 x 6.

#### Transferencia de calor en el piso del horno.

El análisis de esta zona es de vital importancia para el diseño térmico, pues al estar en contacto directo con el suelo del taller, es imposible colocar una capa de material aislante, más aún si se desea aprovechar la estructura ya existente, ya que para colocarlo demandaría mucho trabajo extra para retirar el lecho de ladrillos refractarios y con él el sistema de rieles para la carga con el que cuenta el horno.

Por las razones antes expuestas, se tratará ésta zona bajo condiciones críticas para el diseño, es decir se diseñará asumiendo una baja temperatura en el extremo del lecho del horno, que está en contacto directo con el suelo.



**Figura 46. Piso del horno**

Las condiciones iniciales para el piso del horno se presentan a continuación:

$$T_i = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 1292 \text{ }^\circ\text{F}$$

Se asume entonces una temperatura crítica de 15 °C para esta zona del diseño.

$$T_o = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 59 \text{ }^\circ\text{F}.$$

El coeficiente convectivo para el interior del horno se mantiene en:

$$h_i = 1,5 \frac{Btu}{hpie^\circ F}$$

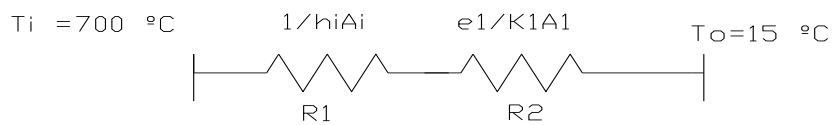
En el exterior del piso del horno, la transferencia de calor se produce únicamente por conducción, por lo tanto no se considera un coeficiente convectivo exterior ( $h_o$ ).

Entonces se mantiene únicamente el coeficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario que ya conocemos.

$$k_1 = 0,58 \frac{Btu}{hpie^\circ F}$$

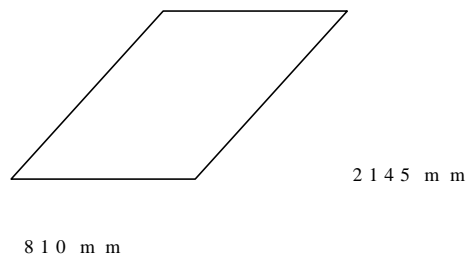
El espesor de la pared que presenta resistencia térmica es:

$$e_1 = 10,5 \text{ cm} = 0,3445 \text{ pie}$$



**Figura 47. Circuito térmico del piso del horno**

El área de transferencia de calor para esta zona se representa en el esquema a que sigue:



**Figura 48. Superficie del piso**

$$A_i = 1,3745 \text{ m}^2 = 18,69 \text{ pie}^2$$



Con éstos datos planteamos la ecuación correspondiente al flujo del calor a través del circuito correspondiente:

$$q_6 = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{hiAi} + \frac{e_1}{k_1Ai}}$$

$$q_6 = \frac{1292^\circ F - 59^\circ F}{\frac{1}{1,5 \frac{Btu}{hpie^2 \circ F} * 18,69 pie^2} + \frac{0,34 pie}{0,58 \frac{Btu}{hpie \circ F} * 18,69 pie^2}}$$

$$q_6 = 18397,49 \frac{Btu}{h}$$

Como puede observarse, el flujo de calor perdido a través del piso del horno es muy elevado, convirtiéndolo en un sumidero de calor, por esta razón el diseño se realiza bajo condiciones críticas.

#### **Cálculo del calor perdido.**

Una vez que se calculó el flujo de calor a través de cada una de las paredes compuestas que conforman el horno, se puede determinar el total del calor que es rechazado a través de las mismas.

Para tal efecto se realiza la sumatoria de cada uno de los valores de  $q_n$  que se obtuvo anteriormente.

$$Q_p = \sum q_n$$

Dónde :

$Q_p$  = El valor total de la suma del flujo de calor en cada una de las paredes del horno.

$q_n$  = Flujo de calor en las paredes, techo y piso respectivamente.

De tal modo que se desarrollando la expresión tenemos:

$$Q_p = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

$$Q_p = 2249,12 \frac{Btu}{h} + 2249,12 \frac{Btu}{h} + 2254,66 \frac{Btu}{h} + 1051,145 \frac{Btu}{h} + 1035,39 \frac{Btu}{h} + 18397,49 \frac{Btu}{h}$$

$$Q_p = 27236,925 \frac{Btu}{h}$$

Se aplica un factor de conversión adecuado, con el propósito de manejar unidades internacionales:

$$Q_p = 27236,925 \frac{Btu}{h} * \frac{1Kcal}{3,968Btu} * \frac{1h}{3600s} * \frac{1Kw}{0,239 \frac{Kcal}{s}}$$

$$Q_p = 7,97Kw$$

**Cálculo necesario para el calentamiento de la carga.**

Ahora es necesario calcular el calor necesario para realizar el tratamiento térmico requerido. Para el revenido de los álabes, es necesario elevar la temperatura de la pieza hasta 600 °C, durante siete horas, sin embargo para compensar las posibles pérdidas de calor, se decidió elevar la temperatura del horno hasta 700 °C. Como ya se explicó anteriormente.

Es preciso también considerar la masa de la vagoneta que soporta al álabe, puesto que este elemento también absorberá energía y esto se reflejará en el calor necesario en el horno.

Considerando entonces un flujo de calor en estado estable, se puede calcular la necesidad teórica de calor para la masa que se calentará en el horno a la temperatura predeterminada.

Para ello tomamos la siguiente expresión:

$$Q_u = \frac{m * C_p * (T_f - T_o)}{t}$$

En dónde:

$Q_u$  = Calor necesario para calentar la masa de los álabes hasta la temperatura requerida

Dónde debe distinguirse:

$m_a$  = masa del álabes = 1000 Kg. (dos álabes de 500 Kg cada uno)

$m_v$  = masa actual de la vagoneta = 188 Kg.

Ahora, se estima que con las adecuaciones que se harán a la vagoneta para que sea capaz de soportar los dos álabes en cada carga se añadan 35 kg. de material que representa aproximadamente un 20% del peso actual.

Entonces se asume un peso de la vagoneta de 223 Kg.

$C_{p_a}$  = Calor específico del material a calentar (álabes) a presión constante

$C_{p_v}$  = Calor específico del material de la vagoneta, a presión constante.

Como la vagoneta está construída con materiales diversos (rodillos, placas, tubos, pernos, etc.), se asume un mismo valor de calor específico para todo el conjunto que es básicamente acero.

El valor de  $C_p$  para el acero es de 434 J/Kg°K,

El valor de  $C_p$  para el material del álabe es de  $430 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$

Por otro lado:

$T_f$  = Temperatura final que alcanzará el álabe

$T_o$  = Temperatura a la que ingresa el álabe al horno.

$t$  = Tiempo necesario para alcanzar la temperatura del tratamiento térmico

Definiendo los valores y sus unidades se tiene entonces que:

$$m_a = 1000 \text{ Kg}$$

$$m_v = 223 \text{ Kg}$$

Calor específico del álabe:

$$C_{p_a} = 430 \text{ J / Kg }^\circ\text{K}$$

$$C_{p_a} = 0,10277 \text{ Kcal /Kg }^\circ\text{K}$$

Calor específico de la vagoneta:

$$C_{p_v} = 434 \text{ J / Kg }^\circ\text{K}$$

$$C_{p_v} = 0,1037 \text{ Kcal /Kg }^\circ\text{K}$$

$$T_f = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 973 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ }^\circ\text{C}$$

Como ya se expresó anteriormente, la relación tiempo \* espesor de la pieza para el calentamiento gradual de la misma resultó que la gradiente de ascenso de la temperatura recomendado es de:

$$t = 14 \text{ horas}$$

Reemplazando éstos valores en la ecuación antes mencionada se obtiene:

$$Q_{ua} = \frac{1000 \text{Kg} * 0.10277 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ \text{K}} * (973^\circ \text{K} - 293^\circ \text{K})}{14 \text{h}}$$

$$Q_{ua} = 4991,68 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Se debe analizar también el calor que absorberá la vagoneta de carga, entonces se tiene:

$$Q_{uv} = \frac{223 \text{Kg} * 0.10372 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ \text{K}} * (973^\circ \text{K} - 293^\circ \text{K})}{14 \text{h}}$$

$$Q_{uv} = 1123,43 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

El calor total necesario será la suma tanto del calor necesario para calentar la masa del álabo como el calor que es absorbido por la vagoneta:

$$Q_{u \text{ total}} = Q_{ua} + Q_{uv}$$

$$Q_{u \text{ total}} = 4991,68 \text{ Kcal/h} + 1123,43 \text{ Kcal/h} = 6115,11 \text{ Kcal/h}$$

Aplicando un factor de conversión:

$$Q_u = 6115,11 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} * \frac{3,968 \text{Btu}}{1 \text{Kcal}} = 24264,75 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q_u = 6115,11 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1\text{Kw}}{0,239 \frac{\text{Kcal}}{\text{s}}} = 7,1072\text{Kw}$$

**Consumo calorífico del horno. (Q)**

El calor que liberará el horno es igual a la suma del calor requerido en el proceso de calentamiento más las pérdidas de calor del horno.

Ahora al conocer el valor del calor perdido  $Q_p$  y el valor del calor necesario  $Q_u$ , se puede determinar el calor total que consumirá el horno en operación (Q), añadiendo además un factor de seguridad que en este caso, se estima en 20 %, a través de la siguiente ecuación:

$$Q = (Q_p + Q_u) \times 1,2$$

$$Q = \left( 27236,925 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} + 24264,75 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right) \times 1,2$$

$$Q = 61802,01 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

Convirtiendo a unidades internacionales, se obtiene el siguiente resultado:

$$Q = 15575,1033 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 18,102\text{Kw}$$

**Cálculo del rendimiento del horno ( $\eta$ ).**

La eficiencia del horno puede cuantificarse a través de la siguiente expresión:

$$\eta = \left( \frac{Q}{Q + Q_p} \right) * 100\%$$

$$\eta = \left( \frac{61802,01 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}}{61802,01 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} + 27236,925 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}} \right) * 100\%$$

$$\eta = 69,41\%$$

#### **Cálculo de la potencia del horno.**

La potencia que requiere el horno, es una función de la eficiencia del consumo calorífico y del tiempo, éstas variables se combinan a partir de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q}{\eta}$$

Dónde :

P = Potencia del horno

$\eta$  = Rendimiento del horno

Q = Consumo calorífico del horno

Reemplazando los datos de los que se dispone, entonces se tiene:

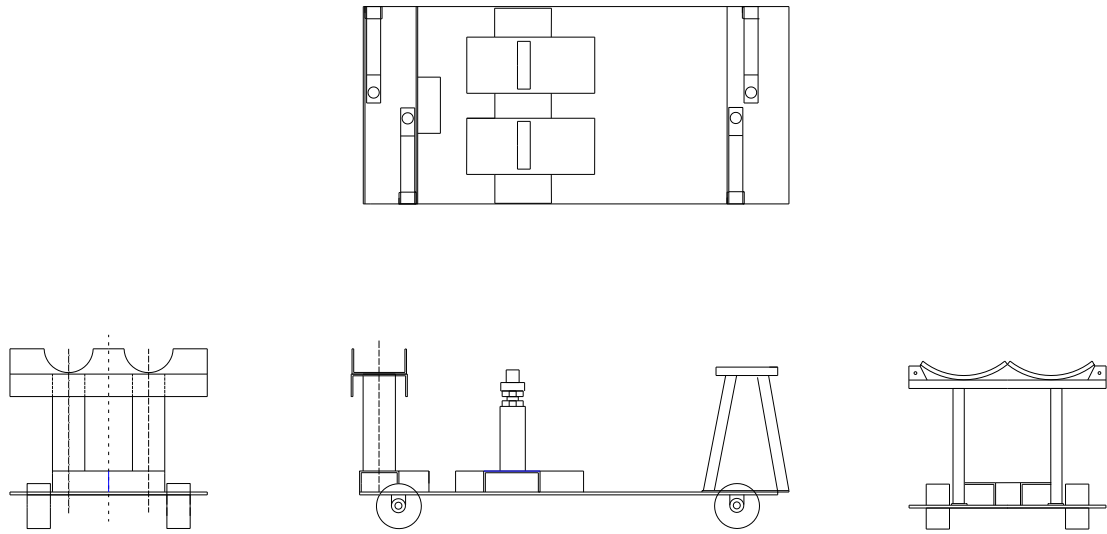
$$P = \frac{18,102 \text{ Kw}}{0,6941}$$
$$P = 26,079 \text{ Kw}$$

Por efectos de facilidad de encontrar los insumos necesarios en el mercado se decide asumir esta cifra en una potencia necesaria de 30 Kw.

#### **4.5.Rediseño mecánico**

En apartados anteriores se enunció que el rediseño del horno permitirá el tratamiento de dos álabes por cada carga en el horno, para tal efecto será necesario realizar modificaciones en la vagoneta para que sea capaz de ingresar a dos de éstos elementos mecánicos.

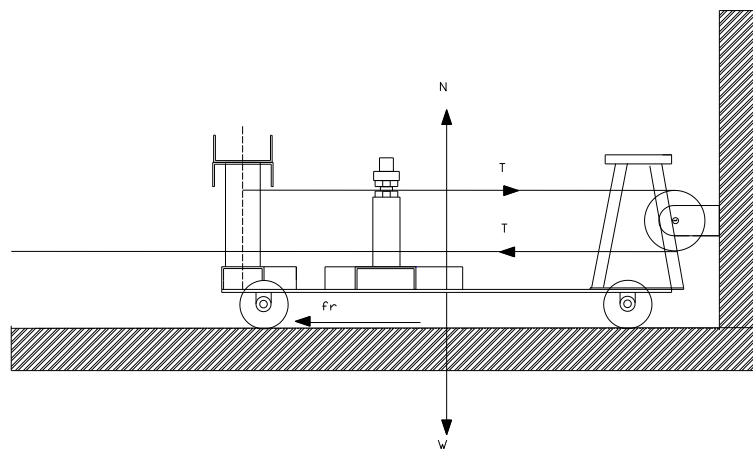
A continuación se muestran las modificaciones para la vagoneta que debe ser construída:



**Figura 49. Esquema de la vagoneta de carga modificada**

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema de arrastre de la carga hacia el interior del horno, se realizará a través de un polipasto compuesto por una polea anclada en la pared posterior del horno y un tejele que suministrará la fuerza necesaria para el arrastre desde el exterior.

A continuación se expone el diagrama del cuerpo libre del sistema.



**Figura 50. Diagrama del cuerpo libre de la vagoneta**

En dónde:



N = Fuerza Normal

W = Peso del conjunto de la carga (álabes y vagoneta)

T = Tensión en la polea del polipasto

Fr = Fuerza de rozamiento entre las ruedas y los rieles.

Para efectos de cálculo será necesario asumir condiciones estáticas de equilibrio, entonces es necesario tomar un valor para el coeficiente de rozamiento  $\mu$ .

$$\mu = 0,6$$

El Coeficiente de fricción se considera como el valor más alto propuesto en la Tabla 8.1."Valores aproximados de los coeficientes de fricción estáticas para superficies secas" de Beer - Johnston. Para el caso de Metal sobre metal <sup>6</sup>

Tomando el valor más alto del coeficiente de fricción se asegura un sobredimensionamiento suficiente para enfrentar el caso más crítico.

Tomando las expresiones del equilibrio estático, se plantea que:

$$\sum Fy = 0$$
$$N = W$$

Se sabe que el peso del conjunto de la carga alcanzará los 1223 Kg.

Entonces reemplazando se tiene que:

$$\sum Fy = 0$$
$$N = 1223Kg$$

Ahora se plantea la ecuación para el equilibrio en el eje x

---

<sup>6</sup> BEER - JOHNSTON. Mecánica Vectorial para Ingenieros. McGraw Hill. Sexta Edición.. México - 1999

$$\sum F_x = 0$$

$$T = fr$$

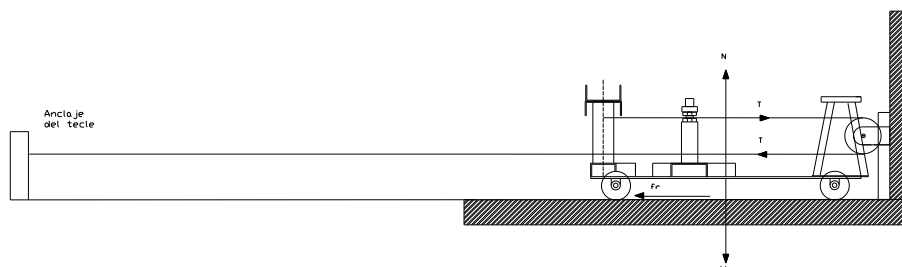
$$T = (N * \mu)$$

$$T = 1223 \text{ Kg} * 0,6$$

$$T = 733,8 \text{ Kg}.$$

El resultado de esta Tensión en la cadena demuestra que para la operación de arrastre, hacia el interior de la vagoneta con la carga de los dos álabes, así como la extracción de la carga una vez concluído el ciclo, será suficiente la instalación de un tecele con la capacidad de 1 Tn.

Es preciso señalar que debe colocarse en el fondo del horno una pequeña columna metálica dónde se pueda aplicar con seguridad el anclaje de la polea de arrastre, porque hay que recordar que la pared posterior del horno tendrá un espesor de sólo 5 cm de ladrillo refractario, para dejar lugar al aislamiento térmico. Así mismo debe colocarse otra columna a 2,5 m de la puerta del horno para asegurar al tecele que arrastrará a la vagoneta.



**Figura 51. Sistema de arrastre de la carga**

#### **4.6. Selección de materiales**

##### **Selección de resistencias eléctricas**

Existen aleaciones muy numerosas para tal finalidad. Debe considerarse un punto muy importante: las temperaturas máximas de trabajo indicadas por cada fabricante de resistencias, no deberán ser confundidas con las temperaturas reinantes en el horno.

La ubicación de la resistencia se basa en la radiación hacia todas las superficies de la carga. De dónde las dimensiones de la altura y el ancho de la cámara de calentamiento influyen en la elección entre resistencias para las paredes laterales y para el techo; en algunos casos se colocan en ambos sitios.

La tendencia actual es incorporar la espiral resistente a la pared de material refractario con lo que se consigue alto rendimiento con la potencia instalada del orden del 50% de la instalada con otro procedimiento.

Del catálogo de Watlow, se extrae que una de las soluciones óptimas para el calentamiento eléctrico del horno podría tratarse de los calentadores de fibra cerámica.

Estas unidades calefactores pueden presentarse en forma de:

- Elementos en espiral
- Elementos recubiertos planos y en configuración en V
- Elementos expuestos planos y en configuración en V

Las unidades en espiral pueden disponerse en forma plana o en configuración en V, tal como se muestra en la figura:

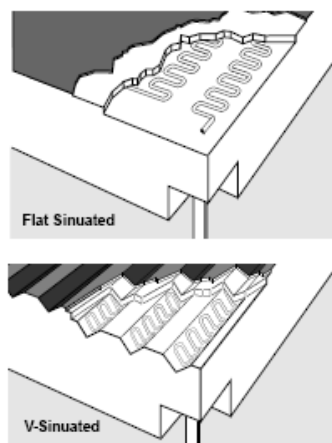


Figura 52. Configuración de los calefactores

Aplicaciones y datos de rendimiento.

Considerando la información del catálogo, en la página 158 del mismo, se considera que la mejor configuración de las terminales eléctricas del panel calefactor corresponde al Tipo 5, debido a que sería muy sencillo realizar las perforaciones necesarias en las paredes y techo del horno, con el propósito de canalizar los conductores de energía eléctrica hasta los elementos calefactores, tal como se muestra en la gráfica del mismo.

## Ceramic Fiber Products

### Ceramic Fiber Heaters

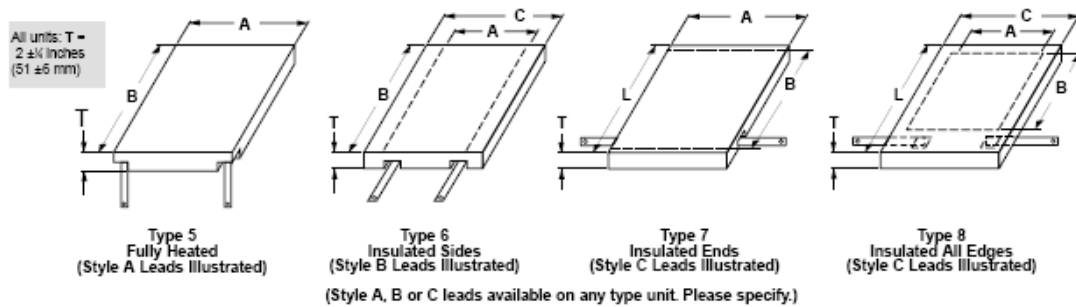
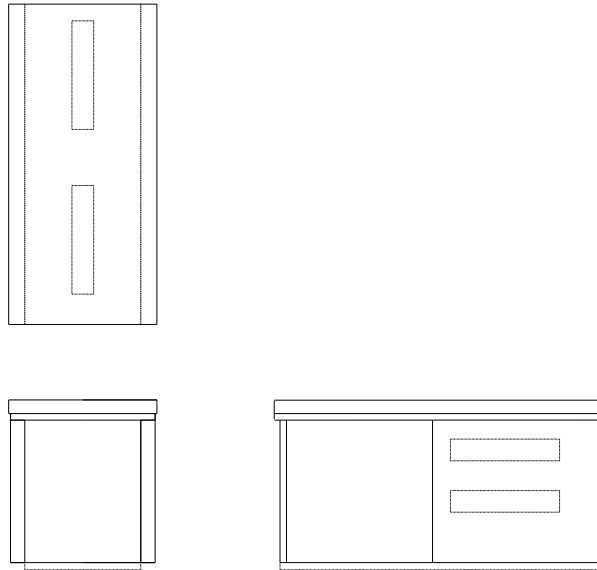


Figura 53. Calefactores de fibra cerámica refractaria

En los análisis anteriores se decidió que la potencia instalada en el horno sería de 30 Kw, pensando ya en las compensaciones a las posibles pérdidas que pueden presentarse en el sistema, así como por el envejecimiento de las resistencias eléctricas.

Para asegurar una radiación uniforme de calor sobre las masas que se van a calentar se decide montar en el equipo un total de 6 paneles calefactores, distribuidos de la siguiente manera:

- 2 paneles en cada pared lateral
- 2 paneles montados en el techo.



**Figura 54. Distribución de los calefactores en el horno**

Entonces la potencia nominal del horno deberá distribuirse entre éstos elementos, así dispuestos. De tal forma que sea la mayor concentración de masas de la carga, quien reciba la mayor concentración del calor entregado por los elementos calefactores.

Por lo tanto, debe existir el suficiente sobredimensionamiento que compense ésta disminución de potencia en las resistencias eléctricas.

**Tabla 13. Especificaciones de los calefactores seleccionados**

**Flat Units—High Watt Density Sinuated Elements** (see page 142)

Dimensions, inches (mm)				Electrical Rating			Strip Lead Width in (mm)	Approximate Net Wt.			Avail.	Code No.
Type 5 Heated Size		Type 6 & 8	Type 7 & 8	Volts	Power (Watts) ±5%	Surface Loading W/in <sup>2</sup> (W/cm <sup>2</sup> )		Type 5	Type 6 & 7	Type 8		
Width (A) in (mm) ±% -X(1.6-3.2)	Length (B) in (mm) ±% -Y(1.6-3.2)	Width (C) in (mm) ±% -X(1.6-3.2)	Length (L) in (mm) ±% -Y(1.6-3.2)				lbs (kg)	lbs (kg)	lbs (kg)			
6 (152)	12 (305)	10 (254)	16 (406)	60	1250	17.4 (2.7)	½ (13)	1.7 (0.8)	2.7 (1.6)	3.6 (1.2)	Standard	VF006A12T
	18 (457)	10 (254)	22 (559)	120	2000	18.5 (2.9)	½ (13)	2.6 (1.2)	3.7 (2.1)	4.6 (1.7)	Standard	VF_06A18T
	24 (610)	10 (254)	28 (711)	120	2500	17.4 (2.7)	½ (13)	3.2 (1.5)	5.0 (2.7)	5.9 (2.3)	Stock	VF_06A24T
	24 (610)	10 (254)	28 (711)	240	2500	17.4 (2.7)	½ (13)	3.2 (1.5)	5.0 (2.7)	5.9 (2.3)	Stock	VF_06A24U
	30 (762)	10 (254)	34 (864)	240	3400	18.9 (2.9)	½ (13)	4.5 (2.0)	7.1 (3.6)	7.9 (3.2)	Stock	VF_06A30T
	36 (914)	10 (254)	40 (1016)	240	4000	18.5 (2.9)	½ (13)	5.5 (2.5)	8.5 (4.2)	9.3 (3.9)	Standard	VF_06A36T
8 (203)	12 (305)	12 (305)	16 (406)	60	1800	18.7 (2.9)	¾ (19)	2.3 (1.0)	3.0 (1.8)	3.9 (1.4)	Stock	VF_08A12T
	18 (457)	12 (305)	22 (559)	120	3000	20.8 (3.2)	¾ (19)	3.5 (1.6)	4.6 (2.5)	5.5 (2.1)	Stock	VF_08A18T
	24 (610)	12 (305)	28 (711)	120	3600	18.7 (2.9)	¾ (19)	4.4 (2.0)	6.1 (3.2)	7.0 (2.8)	Stock	VF_08A24T
	30 (762)	12 (305)	34 (864)	240	5000	20.8 (3.2)	¾ (19)	6.1 (2.8)	8.7 (4.4)	9.7 (4.0)	Standard	VF_08A30T
	36 (914)	12 (305)	40 (1016)	240	6000	20.8 (3.2)	¾ (19)	7.0 (3.2)	10.0 (5.0)	11.0 (4.5)	Standard	VF_08A36T

Todas las unidades en este cuadro son adecuadas para su uso hasta 1800 ° F (982 ° C) la temperatura de la superficie máxima.

Se puede observar en el catálogo de Watlow, que la posible elección sean 6 elementos de 5000 ± 5% W atts de potencia, recordando que están diseñados para una alimentación eléctrica de 240 Voltios. Se debe recordar que la alimentación eléctrica del horno es de 220 voltios ± 10% por lo tanto esta diferencia en los voltajes de alimentación y de diseño no representa un mayor problema, sin embargo cabe señalar que la vida útil de los elementos calefactores podría verse ligeramente reducida por tales motivos.

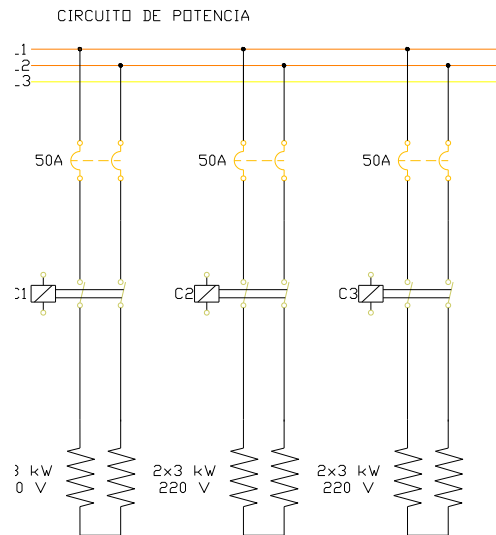
Por lo tanto la selección de calefactores eléctricos corresponde a 6 calefactores planos de fibra cerámica, correspondientes a la codificación del catálogo VF508A30T.

En la tabla de selección que se indica en este apartado pueden apreciarse los distintos tipos de terminales de conexión eléctrica, para esta aplicación se escogen las terminales del tipo 5 con el propósito de facilitar la conexión eléctrica, realizando los respectivos agujeros en las paredes y techos del horno que permitan el paso de los conductores eléctricos que alimenten el sistema de calefacción.

#### **Conexiones eléctricas**

Hay que recordar y tener muy en claro la potencia y el voltaje con el que deben alimentarse éstos elementos de calefacción por lo tanto éstas resistencias eléctricas deben ser conectados en paralelo.

Debido a la corriente eléctrica que circulará por los conductores de las resistencias se espera una vibración de éstos elementos, por ello, se recomienda que los mismos sean recubiertos con fibra cerámica refractaria en el interior de los agujeros que se realizarán en las paredes y techo, para el paso de los cables de conducción eléctrica, con el objeto de minimizar dicha vibración.



**Figura 53. Circuito de potencia**

#### 4.7. Mantenimiento del horno

##### Consideraciones para el mantenimiento del horno.

- Antes y después de cada operación del horno, se deben observar las condiciones del sistema eléctrico
- Las instalaciones eléctricas y el horno deben mantenerse con regularidad. Esto incluye a inspecciones regulares, particularmente donde se usan enchufes y cables flexibles.

- Las instalaciones eléctricas y el horno deben comprobarse periódicamente para asegurar que las juntas, paredes, conexiones, aislamiento y protección eléctrica funcionarán debidamente.
- Si se encuentran fallas, el horno y las instalaciones se sacarán de servicio hasta que las fallas se corrijan.
- Cualquier trabajo realizado en el horno o las instalaciones eléctricas debe llevarse a cabo por un profesional capacitado que está familiarizado con este tipo de equipo.
- Los operadores de hornos deben mantener archivos actualizados de la naturaleza y alcance de todos los trabajos de mantenimiento y reparación realizados en el horno.

Algunos elementos como el polvo, la humedad, los ambientes corrosivos, vibraciones, sobrecargas, entre otras, pueden afectar el funcionamiento y la vida útil del horno y su conservación.

Por lo tanto debe tenerse especial cuidado en algunos puntos del manejo del equipo como por ejemplo:

**L i m p i e z a :**

Los sistemas eléctricos son vulnerables a la acumulación de suciedad, ya sea la acumulación de partículas que se encuentran en suspensión en el ambiente, partículas metálicas procedente de otras operaciones del taller, residuos químicos, etc.



Por ello debe realizarse una limpieza periódica del área del horno, para minimizar las averías que pudieran presentarse por el depósito de pequeñas partículas.

#### **Mantener el ambiente libre de humedad.**

La acumulación de humedad en el equipo puede ocasionar un cortocircuito y posterior falla del sistema eléctrico del horno, así como la oxidación de las partes metálicas del mismo, además la humedad favorece la adhesión de partículas de polvo, lo que también puede generar averías.

#### **Algunas consideraciones de seguridad**

Los hornos eléctricos para tratamiento térmicos deben usarse solamente por operadores capacitados quienes conocen procedimientos seguros de trabajo, uso correcto de los controles y mecanismos de seguridad, y son capaces de reconocer peligros y encargarse de emergencias.

Los peligros de los hornos eléctricos incluyen choques eléctricos, quemaduras e incendios. Se puede asegurar la seguridad si los hornos se diseñan bien y si se instalan, se ubican, se operan y se mantienen de manera apropiada.

Por ningún motivo, se debe tratar de enfriar la cámara con agua, ya que puedan dañarse los materiales refractarios y las resistencias eléctricas. Se debe enfriar el horno desconectando la corriente eléctrica y abriendo la puerta para que el enfriamiento se realice por ventilación, cuidando que la temperatura en el horno no sea demasiado alta o

se vaya a dañar al personal que se encuentra trabajando en las inmediaciones, ni existan acumulados en las inmediaciones materiales combustibles.

- Por cuestiones de seguridad el horno está ubicado lejos de áreas usuales de trabajo general en un área separada del taller
- Está ubicado en un piso de carga con mucho espacio entre el horno y el techo.
- El piso, techo y paredes cerca del horno deben todos hacerse de un material no combustible.
- Se debe dejar espacio suficiente alrededor del horno para permitir mantenimiento, servicio y movimiento libre de aire.
- Todos los hornos sin conexiones permanentes deben conectarse directamente a tomas de corriente suficientemente clasificadas y protegidas sin usar una extensión.
- El buen aseo alrededor del horno es esencial y nunca debe almacenarse materiales combustibles cerca de él.
- Los controles de operación deben localizarse de manera que la puerta del horno no obstruya el acceso a ellos al estar abierta.
- Antes de instalar el horno eléctrico, el sistema eléctrico debe inspeccionarse y comprobarse por personal calificado para determinar si es seguro.
- Para asegurar suficiente personal en la ausencia del operador normal, dos o más personas deben ser capaces de operar el horno y deben estar familiarizadas con procedimientos de emergencia.
- Deben fijarse cerca instrucciones por escrito sobre el funcionamiento seguro y los procedimientos de emergencia para el horno, junto con una lista de los operadores capacitados y sus números telefónicos.

- Se deben adoptar y usar prácticas seguras cuando el horno esté en funcionamiento.
- Al retirar la carga del horno todavía caliente, se debe siempre usar lentes protectivos y guantes que proporcionen protección termal.
- Por la naturaleza del producto calentado, el meterlo y sacarlo del horno tal vez represente un peligro, al mantenerse a una temperatura elevada
- Los operadores capacitados necesitarán considerar tanto las cargas que se manejan durante esas operaciones como la cantidad de movimientos que hay que hacer.
- Todos los empleados involucrados en el manejo manual de objetos pesados deben recibir capacitación adecuada para prevenir lesiones.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE COSTOS

#### Costos de materiales y construcción

Los costos de materiales y de la construcción del proyecto pueden definir la construcción o no de un determinado equipo, además que se la tendencia debe encaminarse a una buena construcción que cumpla con los requerimientos técnicos con los materiales disponibles en el mercado nacional.

Se incluyen los costos de materiales, de utilización de maquinaria y de mano de obra, empleando en lo posible la mayor cantidad de materiales nacionales, de esta manera se logrará:

- Disminución de los costos
- El equipo estará disponible en menor tiempo que si se tratara de importar.
- El equipo no se expone a posibles riesgos de daños por el transporte

#### Superficie total a recubrir con aislamiento térmico:

Para determinar la cantidad necesaria de lana de vidrio para aislar eficientemente la superficie del horno, basta con sumar cada una de las áreas que se consideraron en los cálculos de transferencia de calor.

Entonces se tiene que:

Superficie total = Superficie de las paredes laterales + Superficie del techo

+ Superficie de la puerta + Superficie de la pared posterior.

$$\text{Superficie total} = 2 \times (2,245 \text{ m}^2) + 2,3235 \text{ m}^2 + 0,891 \text{ m}^2 + 0,891 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie total} = 8,59 \text{ m}^2$$

Dividiendo éste valor para la superficie de cada colchoneta se obtendrá entonces la cantidad necesaria de aislamiento que debe adquirirse:

$$\text{Num.de.colchonetas} = \frac{\text{Sup.total}}{\text{Sup.colchoneta}}$$

$$\text{Num.de.colchonetas} = \frac{8,59\text{m}^2}{3,25\text{m}^2}$$

$$\text{Num.de.colchonetas} = 2,64$$

En conclusión se requiere adquirir 3 colchonetas de lana de vidrio de un espesor de 4” para cada una de ellas.

#### **Cálculo de la cantidad necesaria de chapa metálica**

Se procede entonces a realizar el cálculo de la cantidad de chapa metálica necesaria para recubrir el horno, una vez que se ha colocado también las cuatro pulgadas de aislamiento térmico.

El techo tiene las siguientes dimensiones:

Superficie del techo: (2,3055 m x 1,035 m)

Aquí debe considerarse un aumento de 10 cm a cada lado por el aislamiento de cada pared lateral, entonces la superficie recubierta por chapa metálica en el techo será:

Superficie del recubrimiento del techo:  $(2,3055 \text{ m} \times 1,235 \text{ m}) = 2,846 \text{ m}^2$

Las paredes laterales tienen por dimensiones:

Superficie de las paredes laterales:  $2 \times (2,262 \text{ m} \times 1,190 \text{ m})$

Ahora debe incluirse aquí 10 cm del espesor de la colchoneta que será montada sobre el techo, entonces la superficie del recubrimiento metálico será:

Superficie de las paredes laterales:  $2 \times (2,262 \text{ m} \times 1,290 \text{ m}) = 5,835 \text{ m}^2$

Superficie de las caras de la puerta:  $2 \times (1,1 \text{ m} \times 0,81 \text{ m}) = 1,78 \text{ m}^2$

Por lo tanto la superficie total que debe recubrirse con chapa metálica será de  $10,5 \text{ m}^2$

#### **Descripción de costos**

Los costos directos que se exponen a continuación corresponden al mes de Mayo del año 2008.

#### **Costos de materiales**

<b>Cantidad</b>	<b>Denominación</b>	<b>costo unitario</b>	<b>costo total</b>
3	Colchonetas de lana de vidrio	28,29 + IVA	84,87 + IVA

2	Cajas de fibra cerámica refractaria	78,44 + IVA	156,88 + IVA
4	Chapas de acero de 1/16	54,96 + IVA	219,84 + IVA
6	Calefactores de fibra cerámica	672,15 + IVA	4032,90 + IVA
1	Controlador de Potencia	213,00 + IVA	213,00 + IVA
1	Saco de cemento refractario	30,25 + IVA	
1	Tecla para dos toneladas	24	24
4 m	Cable	1,6	6,4
1	Polea	19,50	19,50
1 m <sup>2</sup>	Tela de aluminio	3,70	3,70

**TOTAL** \$ 5332,42 (Este total ya incluye el IVA)

**Costo del transporte**

Operación	Tiempo (h)	Costo /(h)	Costo Total
-----------	------------	------------	-------------

Flete del transporte de las

chapas metálicas desde

la ciudad de Ambato

1

24,78

24,78

**TOTAL**

**\$ 24,78**

**Costo de mano de obra**

Operación	Tiempo (h)	Costo /(h)	Costo Total
-----------	------------	------------	-------------

Construcción del

techo del horno

8

2,25<sup>7</sup>

18

---

<sup>7</sup> Precios pagados por la empresa durante el mes de Mayo del 2008 para obreros de la construcción

M o n t a j e d e l a i s l a m i e n t o			
t é r m i c o	24	2,66	63,84
T r a b a j o s e n e l t a l l e r m e c á n i c o	44	2,66	117,04
M o n t a j e d e l a s r e s i s t e n c i a s			
e l é c t r i c a s	24	2,66 <sup>8</sup>	63,84
<b>T O T A L</b>			<b>\$ 262,72</b>

### C O S T O T O T A L

En esta parte del análisis de costos es necesario precisar que el presupuesto general, debería incluir un ítem adicional por concepto de costos de ingeniería del proyecto, el mismo que supondría un 7% del costo total del horno, sin embargo por tratarse de un convenio con Hidroagoyán S. A. para el desarrollo de este trabajo de tesis no se considera esta inversión

El costo total se calcula con la suma de cada uno de los subtotales de los ítems anteriores:

$$C t = C m a t + C m a q + C m a n$$

D ó n d e :

C t = Costo total

C m a t = Costo total de materiales

C m a q = Costo total de maquinaria utilizada

C m a n = Costo total de mano de obra.

Entonces se tiene que:

---

<sup>8</sup> Precios pagados por la empresa durante el mes de Mayo del 2008 para empleados del taller.



$$Ct = 5332.42 + 24,78 + 262,72$$

**Costo Total de construcción y montaje = \$ 5619,92**

### **Costo de operación**

Hidroagoyán S. A. es una empresa que cuenta con autogeneración, es decir consume la energía eléctrica que ella misma produce, en otra industria el pago por concepto del consumo de energía eléctrica en el proyecto sería un aspecto importante del presupuesto.

En promedio el consumo mensual de energía eléctrica de Hidroagoyán S. A por Servicios Auxiliares es de 135 Mwh.

Se sabe además que la empresa paga 3 centavos de dólar el Kwh consumido. Entonces se destina para este rubro un promedio de \$ 4050.

En el consumo particular del horno en cuestión, se sabe que está diseñado para 30 kW, suponiendo un trabajo a máxima potencia por las 90 horas que dura cada proceso, da un total de 2700 Kwh, lo que resulta un gasto de \$ 81 por cada carga del horno.

## CONCLUSIONES

- 1 Es posible generar tecnología propia aprovechando en su mayoría materiales nacionales y disponibles en el mercado nacional, impulsando así a la industria y comercio del país a la vez que se disminuyen los costos de importación de equipos desde el exterior que pueden averiarse en el transcurso del envío.
- 2 La rehabilitación del horno de Hidroagoyán es factible a través de las adecuaciones e implementaciones sugeridas en este trabajo, a un bajo costo de inversión si es comparado con un equipo de importación. Ya que se aprovecha la estructura que ya se encuentra montada y sobre ella se realizan las propuestas de optimización de la unidad.
- 3 El rediseño del horno permitió cumplir con los requerimientos de la empresa al proyectarse para operar con dos álabes en cada carga, aprovechando la estructura que existe actualmente, optimizándola en base a una disposición de los elementos a tratar, al rediseño de la vagoneta de carga y un eficiente aislamiento térmico.
- 4 A través de las teorías existentes sobre transferencia de calor se estableció la carga térmica necesaria para someter a dos álabes móviles de la turbina Francis a un tratamiento térmico de revenido, para el alivio de tensiones luego de su reparación por soldadura.
- 5 Aprovechando la revisión de las distintas alternativas en el diseño y construcción para hornos de tratamientos térmicos se llegó a establecer la mejor alternativa para

el rediseño del horno en cuestión. Siendo la elección un horno “Dentro – Fuera” de calefacción eléctrica

6 La investigación sobre la aplicación de calefactores de fibra cerámica refractaria, permitirá alcanzar elevadas temperaturas en el horno con la ventaja de aprovechar al máximo el reducido espacio disponible en el interior del horno, además de proveer una atmósfera completamente libre de impurezas que pueda afectar la microestructura de los álabes que serán sometidos al tratamiento térmico de alivio de tensiones.

7 Con el uso de fibra cerámica refractaria, como relleno en la puerta del horno, se consiguió reducir considerablemente su peso y con ello simplificar el diseño de la misma, lo que implica a su vez una reducción de los costos del equipo.

8 En las instalaciones descritas se consigue un gran ahorro de energía, debido a su aislamiento a base de lana de vidrio y refractarios ligeros, evitando el calentamiento de grandes masas y reduciendo las pérdidas de calor, obteniendo una temperatura exterior del horno muy baja a la vez que se consiguen tiempos reducidos de puesta a punto, factores muy importantes para obtener un coste favorable de las tareas de mantenimiento de los álabes.

9 La revisión bibliográfica señaló que la mejor opción para el alivio de tensiones del material del álabe luego de la soldadura es el tratamiento de revenido, con una elevación bastante lenta de la temperatura, pero por debajo de la temperatura crítica,

luego de mantener la carga por un tiempo determinado, enfriar al aire también muy lentamente

## RECOMENDACIONES

1. Todas las industrias que trabajan con medianas o altas temperaturas deben estar obligadas a usar en sus instalaciones lana de vidrio u otro material como aislante térmico de calderos, paredes de hornos, en secadores, equipos de refrigeración y aire acondicionado, así como en tuberías de vapor para evitar la condensación.
2. Gracias a la correcta aplicación de lana de vidrio en la industria se han obtenido significativos ahorros energéticos, traduciéndose éstos en un considerable ahorro de dinero, siendo ésta la razón principal para que las empresas de hoy no puedan prescindir del aislamiento térmico.
3. El stock que se mantiene en bodega de ladrillos refractarios será suficiente para la construcción del techo del horno, en tal virtud no será necesaria la adquisición de más ladrillos refractarios.
4. La IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) y la EPA (Agencia de Protección Ambiental) han determinado que las fibras refractarias de cerámica son posiblemente carcinogénicas en seres humanos. Debe por tanto evitarse perturbar estos materiales.
5. Durante la instalación del aislamiento térmico, el personal debe usar ropa que lo proteja, protección para los ojos y las vías respiratorias. El personal que está expuesto a estas fibras en el trabajo, puede llevarlas a su hogar en la piel, ropa o herramientas. Esto se puede evitar si se ducha y cambia de ropa antes de dejar el

trabajo. La ropa de trabajo debe mantenerse separada de otra ropa y debe ser lavada separadamente.

6. Cuando se realice el montaje de la lana de vidrio sobre las paredes y el techo debe cuidarse la preparación de las superficies que se van a recubrir, ya que deben estar completamente libres de humedad, de partículas de polvo, rebabas metálicas, suciedad etc.
7. La configuración de los rieles para la conducción de la vagoneta de transporte, deja dos espacios libres por debajo de la puerta, que impiden el cierre totalmente hermético de la misma, por lo tanto en cada operación del horno éstos han de sellarse con pequeños bloques de ladrillo refractario conformados previamente para este efecto.
8. En el diseño futuro de hornos, debe considerarse el aislamiento térmico del piso del mismo, para evitar que ésta zona se convierta en un sumidero de calor, y de este modo aprovechar al máximo la energía suministrada al equipo, una buena opción para tal efecto son los hornos de solera móvil.
9. Al añadir un sistema de PLC`s, al controlador de temperatura se puede incluir la regulación del parámetro tiempo, indispensable en el control del proceso del horno.

## **Bibliografía**

- 1) DEL ARCO, Vicente L. Termodinámica. 4ta. ed. Barcelona: Editorial Mitre,  
1984
- 2) HOLMAN, JP. Transferencia de Calor. México: Editorial CECSA, 1986
- 3) KREITH, Frank. Principios de Transferencia de Calor. México: Editorial CECSA,  
1970
- 4) PORGES, C. Prontuario de Calefacción, ventilación y aire acondicionado. 6ta  
Ed.. España: Editorial McGraw Hill, 1974
- 5) RECKNAGEL, SPRENGER. Manual de Calefacción y Climatización. España: ed.  
Molina, 1974
- 6) ROBUSTE. Eloy. El Horno de Túnel al Alcance del Ceramista y del Ladrillero.  
España: Ediciones CEAC, 1969
- 7) GRIMBERG D.M.K. Tratamientos Térmicos de Aceros y sus Prácticas de  
Laboratorio. México: Ed. Limusa, 1986
- 8) VALENZUELA, Ramiro. Apuntes de Transferencia de Calor. Riobamba: Ed.  
Epicentro, 2003
- 9) GROSSMAN - BRAIN. Principios de Tratamientos Térmicos. Madrid: Ed.  
Blume, 1972
- 10) PERRY, Jhon. Manual del Ingeniero Químico. México: Ed. McGraw Hill, 1974
- 11) WE - 41403 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, CO., LTD A. Junio 15 de 1988
- 12) TRINKS - MAWHINNEY. Hornos Industriales. Bilbao: Ed. Urm o, 1999
- 13) BEER - JOHNSTON. Mecánica Vectorial para Ingenieros. 6ta. Ed. México: ed.  
McGraw Hill, 1999.

## **Sitios Web**

WATLOW. Heaters/Controllers. Catálogos. [www.watlow.com](http://www.watlow.com)

## **A N E X O S .**