



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

REDISEÑO DE UN HORNO PARA ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN TURBINAS HIDRÁULICAS

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Javier Carazo Berrocal
Fabiana Jiménez Chinchilla
Asdrúbal Miranda Calderón

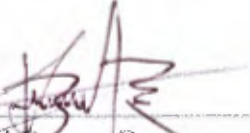
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Enero de 2016

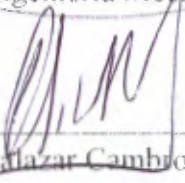
Hoja de tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de La Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.

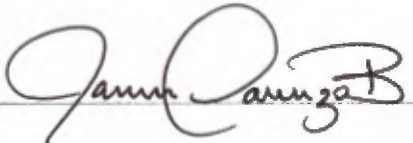

Director de la Unidad Académica
M.Sc. Jhymer Rojas Vásquez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor director
Mag. Juan Gabriel Monge Gapper
Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor interno
Lic. Ronald Brenes Brenes
Escuela de Ingeniería Mecánica


Asesor externo
Lic. Javier Salazar Cambonero
Compañía Nacional de Fuerza y Luz


Docente curso Proyecto II
Mag. Marco Calvo Vargas
Escuela de Ingeniería Mecánica


Javier Carazo Berrocal


Fabiana Maria Jiménez Chinchilla


Asdrúbal Miranda Calderón

Índice General

Hoja de tribunal.....	ii
Índice de ilustraciones.....	vi
Índice de cuadros.....	ix
Resumen.....	xi
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Justificación y antecedentes.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.5 Alcance y limitaciones.....	5
2 Marco teórico.....	6
2.1 Esfuerzos residuales en materiales metálicos.....	6
2.1.1 Definición y origen del fenómeno.....	6
2.1.2 Métodos de atenuación.....	11
2.2 Tratamientos térmicos.....	14
2.2.1 Recocido.....	14
2.2.2 Templado.....	14
2.2.3 Revenido.....	15
2.2.4 Tratamiento térmico de los aceros martensíticos.....	15
2.3 Principios de la transferencia de calor.....	16
2.3.1 Primera ley de la termodinámica.....	17
2.3.2 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario.....	17
2.3.3 Mecanismos de transferencia de calor.....	18
2.3.4 Ecuación de la conducción de calor en una pared plana grande.....	21
2.3.5 Condiciones de frontera iniciales.....	22
2.3.6 El concepto de resistencia térmica.....	25
2.3.7 Red de resistencias térmicas.....	29

2.3.8	Paredes planas de capas múltiples.....	31
3	Tecnologías de los hornos de aplicación industrial.....	35
3.1	Definición.....	35
3.2	Campos de aplicación de los hornos industriales.....	35
3.3	Hornos para tratamiento térmico.....	37
3.3.1	Modo de operación.....	37
3.3.2	Forma de transferencia de calor.....	39
3.3.3	Medio de transferencia empleado.....	41
3.4	Componentes principales de un horno.....	43
3.5	Hornos eléctricos.....	45
3.5.1	Hornos de resistencia eléctrica.....	46
3.5.2	Elementos de calentamiento de resistencia metálicos.....	51
3.5.3	Elementos de calentamiento de resistencia no metálicos.....	51
3.6	Materiales refractarios.....	52
3.6.1	Composición y aplicaciones.....	52
3.7	Materiales estructurales resistentes a temperaturas altas.....	56
3.8	Medición de la temperatura en el horno.....	57
3.8.1	Medición de temperatura por color.....	58
3.8.2	Termómetros por expansión metálica.....	58
3.8.3	Termómetro de expansión líquida.....	59
3.8.4	Termómetro por presión de gas o vapor.....	59
3.8.5	Termómetro de resistencia.....	60
3.8.6	Pirómetro termoeléctrico.....	60
3.8.7	Termopar.....	61
4	Caracterización del horno actual.....	63
4.1	Procedimiento de operación general.....	63
4.2	Configuración física del horno actual.....	68
4.3	Balance energético del horno.....	71
4.3.1	Fenómenos de transferencia de calor.....	71
4.3.2	Modelo de capacidad térmica global del horno.....	76
4.4	Orificios en las paredes y techo.....	89

4.5	Modelado matemático del horno en condiciones actuales.....	91
4.6	Eficiencia estimada en la condición actual.....	99
4.7	Movilidad de la bandeja que transporta las piezas dentro del horno.....	102
5	Propuesta de diseño.....	104
5.1	Configuración física.....	104
5.2	Aislamiento con ladrillos moldeados.....	104
5.3	Configuración de las resistencias.....	109
5.4	Configuración del sistema de ventilación.....	110
5.4.1	Disposiciones de la ventilación forzada.....	111
5.5	Pérdidas de calor por puentes térmicos.....	113
5.5.1	Cálculo del límite superior de la resistencia, $R_{superior}$	115
5.5.2	Cálculo del límite inferior de la resistencia, $R_{inferior}$	117
5.5.3	Cálculo de la resistencia térmica total R_{total}	119
5.6	Modelo matemático del horno con propuesta de diseño aplicada.....	120
5.6.1	Modelo con resistencias eléctricas a temperatura invariable.....	126
5.6.2	Modelo con atmósfera controlada a temperatura constante.....	129
5.6.3	Resumen de modelos.....	133
5.7	Eficiencia estimada del diseño propuesto.....	134
5.8	Movilidad de la compuerta del horno: consideraciones y propuesta.....	139
5.8.1	Estructura de la compuerta del horno.....	142
5.8.2	Geometría de la estructura y método de cálculo asistido.....	143
5.8.3	Cargas actuantes.....	144
5.8.4	Resultados del análisis.....	149
5.8.5	Ensamble del conjunto.....	151
6	Conclusiones.....	153
7	Recomendaciones.....	157
8	Bibliografía.....	158

9 ANEXOS.....	160
9.1 Cuadros utilizados para el cálculo de la carga sísmica de la estructura de soporte del tecele.....	160
9.2 Ilustraciones de los momentos flexionantes debidos a la carga temporal y por la carga sísmica tanto para el eje X como para el eje Y.....	165
9.3 Análisis sobre el ciclo de enfriamiento dadas las condiciones propuestas.....	168
10 APENDICES.....	169
10.1 Diagrama para código Matlab para la pieza a ser tratada térmicamente.....	171
10.2 Diagramas para código Matlab de las resistencias colocadas en el horno.....	171
10.3 Diagrama para código Matlab del sistema completo horno + pieza.....	173
10.4 Diagrama para código Matlab del piso del horno.....	173
10.5 Diagrama para código Matlab de pared del horno con ladrillos aislantes refractarios.....	174
10.6 Cuadros de control térmico utilizados para generar la curva de ajuste en Matlab. (CNFL).....	176
10.7 Cotización de ladrillo refractario.....	178
10.8 Código Matlab utilizado para la condicion actual del horno.....	179
10.9 Código Matlab utilizado para la condicion de diseño propuesto del horno.....	187

Índice de ilustraciones

YIlustración 2.1 Fenómeno de Tensiones Residuales en Soldadura	
Ilustración 2.2 Estados transitorios y finales durante la soldadura.....	8
Ilustración 2.3 Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales.....	10

Ilustración 2.4 Factores que contribuyen a las tensiones residuales.....	10
Ilustración 2.5 Ámbito de alivio de tensiones.....	13
Ilustración 2.7 Esquema para la resistencia a la convección en una superficie.....	27
Ilustración 2.8 Esquema para la resistencia a la convección y radiación en una superficie.....	29
Ilustración 2.9 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared sujeta a convección sobre ambos lados y la analogía eléctrica.....	29
Ilustración 2.10 Caída de temperatura a través de una capa es proporcional a su resistencia térmica	31
Ilustración 2.11 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared plana de dos capas sujeta a convección sobre ambos lados.....	32
Ilustración 2.12 Evaluación de las temperaturas superficial y en la interface cuando se dan las temperaturas en los extremos y el flujo de calor.....	34
Ilustración 3.1 Horno tipo bache.....	40
Ilustración 3.2 Disposiciones de espirales sobre tubos.....	47
Ilustración 3.3 Alambre en espiral sobre ranuras.....	48
Ilustración 3.4 Disposiciones de espirales sobre ranuras.....	48
Ilustración 3.5 Ondulado sobre ganchos.....	49
Ilustración 3.6 Disposiciones de varilla ondulada.....	49
Ilustración 3.7 Disposición de pletinas onduladas.....	50
Ilustración 3.8 Formas de resistencias metálicas. Helicoidal (izquierda) y Zig-Zag (derecha).....	51
Ilustración 3.9 Posición de resistencias no metálicas en los hornos. Montaje horizontal (izquierda), montaje vertical (derecha).....	52
Ilustración 3.10 Conductividad térmica de materiales aislantes comunes.....	54
Ilustración 3.11 Perfil de temperatura en la sección transversal de la pared de un horno.....	55
Ilustración 3.12 Medida de la temperatura mediante un termopar.....	61
Ilustración 4.1 Apariencia física antes del recargue.....	63
Ilustración 4.2 Proceso antes y después del recargue.....	64
Ilustración 4.3 Distribución de esfuerzos residuales en juntas soldadas.....	64
Ilustración 4.4 Apertura de puerta del horno.....	65
Ilustración 4.5 Rodete listo para ser introducido en el horno.....	65
Ilustración 4.6 Horno con puerta completamente cerrada, listo para iniciar el calentamiento.....	66
Ilustración 4.7 Colocación de los termopares dentro del horno.....	66
Ilustración 4.8 Sistema de monitoreo de temperatura del horno.....	67

Ilustración 4.9 Ubicación del horno en el espacio físico del Taller Anonos.....	69
Ilustración 4.10 Vista interna del horno.....	69
Ilustración 4.11 Vista frontal interna del horno.....	70
Ilustración 4.12 Vista interior del techo del horno. Paneles de resistencias y ventilador.....	70
Ilustración 4.13 Conducción unidimensional estacionaria a través de una pared plana.....	72
Ilustración 4.14 Distribución de temperaturas para conducción estacionaria a través de una pared plana compuesta y el circuito térmico correspondiente.....	74
Ilustración 4.15 Circuito térmico base.....	76
Ilustración 4.16 Pieza tratada térmicamente.....	78
Ilustración 4.17 Paredes del horno y sus componentes.....	79
Ilustración 4.18 Resistencias, principal fuente de calor.....	80
Ilustración 4.19 Configuración del panel de resistencias.....	81
Ilustración 4.20 Circuito térmico para la temperatura del aire.....	88
Ilustración 4.21 Representación gráfica de la equivalencia de resistencias térmicas para obtener la eficiencia térmica del sistema.....	100
Ilustración 5.1 Ladrillo refractario <i>ThermalCeramics</i> tipo K.....	105
Ilustración 5.2 Configuración de una sección de ladrillos aislantes del techo del horno.....	106
Ilustración 5.3 Configuración física de los ladrillos aislantes de las paredes del horno.....	106
Ilustración 5.4 Vista frontal del hogar, configuración propuesta.....	107
Ilustración 5.5 Vista del hogar y bandeja con los ladrillos moldeados instalados.....	108
Ilustración 5.6 Vista del diseño de la bandeja transportadora de piezas.....	108
Ilustración 5.7 Vista exterior de la configuración propuesta del horno.....	109
Ilustración 5.8 Configuración actual física de las resistencias.....	109
Ilustración 5.9 Configuración del panel de resistencias.....	110
Ilustración 5.10 Motor-ventilador centrífugo.....	111
Ilustración 5.11 Diseño de motor-ventilador y deflector.....	112
Ilustración 5.12 Diseño de deflector de aire.....	112
Ilustración 5.13 Vista en corte lateral de pared del horno.....	114
Ilustración 5.14 Flujos posibles de calor en la pared del horno.....	115
Ilustración 5.15 Flujo de calor para el cálculo de la resistencia inferior (R_{inf}).....	117
Ilustración 5.16 Montacargas en proceso de apertura de puerta del horno.....	140

Ilustración 5.17 Formación tipo hilera diseñada para los ladrillos refractarios de la puerta del horno	141
Ilustración 5.18 Diagrama y diseño en 2D de la estructura de soporte del tecele.....	143
Ilustración 5.19 Modelo en SAP 2000 para la estructura del tecele.....	144
Ilustración 5.20 Representación computarizada de la carga permanente de 1 tonelada sobre la estructura de soporte.....	145
Ilustración 5.21 Representación computarizada de la carga temporal de 40 kg/m ² sobre la estructura de soporte.....	146
Ilustración 5.22 Ubicación de la carga sísmica en dirección del eje X y del eje Y.....	148
Ilustración 5.23 Diagrama de momentos por carga permanente CP.....	150
Ilustración 5.24 Vista general del ensamble propuesta.....	152
Ilustración 5.25 Esquema del anclaje del soporte de la estructura al suelo.....	153
Ilustración 10.1 Diagrama para código Matlab de pared del horno sin ladrillos aislantes refractarios	169
Ilustración 10.2 Ilustración de la pared del horno y el sentido de transferencia de calor, sin ladrillos aislantes refractarios.....	170
Ilustración 10.3 Diagramas de las resistencias colocadas en el horno.....	172
Ilustración 10.4 Diagrama del sistema completo horno + pieza.....	173
Ilustración 10.5 Diagrama para el piso del horno.....	173
Ilustración 10.6 Diagrama de pared del horno con ladrillos aislantes refractarios.....	175

Índice de cuadros

Cuadro 2.1 Procedimientos de temple y revenido de aceros inoxidables martensíticos, niveles de resistencia y dureza alcanzadas.....	16
Cuadro 3.1 Campos de aplicación de hornos industriales.....	36
Cuadro 3.2 Ventajas y desventajas de hornos calentados eléctricamente.....	45
Cuadro 3.3 Propiedades típicas de materiales refractarios.....	53
Cuadro 3.4 Propiedades físicas de materiales aislantes.....	54
Cuadro 3.5 Variación del calor con la temperatura.....	58
Cuadro 4.1 Dimensiones del horno y bandeja.....	68
Cuadro 4.2 Dimensiones físicas del horno.....	77
Cuadro 4.3 Dimensiones de la pieza.....	77
Cuadro 4.4 Características de los componentes de la pared del horno.....	79
Cuadro 4.5 Cálculo de la masa de las paredes del horno.....	79
Cuadro 4.6 Cálculo de la masa del piso del horno.....	80
Cuadro 4.7 Ecuaciones de capacitancia térmica.....	83
Cuadro 4.8 Ecuación de resistencia térmica R1.....	84
Cuadro 4.9 Ecuación de resistencia térmica R2.....	84
Cuadro 4.10 Ecuación de resistencia térmica R3.....	85
Cuadro 4.11 Ecuación de resistencia térmica R4.....	85
Cuadro 4.12 Ecuación de resistencia térmica R5.....	86
Cuadro 4.13 Denominación de las variables de temperatura en estado transitorio.....	88
Cuadro 4.14 Equivalencia de resistencias térmicas en condiciones actuales.....	100
Cuadro 4.15 Datos de temperatura y energía de elementos en el sistema actual.....	100
Cuadro 4.16 Energía consumida por cada elemento para aumentar su temperatura.....	101
Cuadro 4.17 Coeficientes de expansión lineal.....	103
Cuadro 5.1 Análisis químico de los ladrillos moldeados tipo K.....	105
Cuadro 5.2 Características de los ladrillos TIPO K.....	105
Cuadro 5.3 Sumatoria resistencia térmica a través del material refractario (1).....	115
Cuadro 5.4 Sumatoria resistencia térmica a través del material refractario (2).....	116
Cuadro 5.5 Resistencia térmica de la capa de material que posee los puentes térmicos.....	117
Cuadro 5.6 Resistencia térmica total de los componentes del horno.....	118

Cuadro 5.7 Ecuación de resistencia térmica de ladrillos refractarios.....	120
Cuadro 5.8 Resumen de modelos matemáticos experimentales	133
Cuadro 5.9 Equivalencia de resistencias térmicas del horno con diseño propuesto aplicado.....	134
Cuadro 5.10 Datos de temperatura y energía de elementos en el diseño propuesto.....	135
Cuadro 5.11 Energía consumida por cada elemento para aumentar su temperatura.....	136
Cuadro 5.12 Resultados obtenidos al modificar la convección de elementos.....	137
Cuadro 5.13 Aprovechamiento de energía de la pieza a calentar.....	138
Cuadro 5.14 Eficiencia energética obtenida para cada caso posible	139
Cuadro 5.15 Datos para la obtención del peso del ladrillo moldeado.....	140
Cuadro 5.16 Datos de los materiales utilizados para el diseño de la estructura de soporte del tecla.	142
Cuadro 5.17 Resumen de datos obtenidos para la estructura.....	151

Resumen

**REDISEÑO DE UN HORNO PARA ALIVIO DE TENSIONES POST
SOLDADURA, COMPAÑÍA NACIONAL DE FUERZA Y LUZ**

Por Asdrúbal Miranda Calderón

Fabiana Jiménez Chinchilla

Javier Carazo Berrocal

(ENERO 26 DEL 2016)

RESUMEN

La sección de mantenimiento mecánico de plantas hidroeléctricas de la *Compañía Nacional de Fuerza y Luz*, realiza una labor de reparación en los elementos giratorios de las turbinas por medio de un proceso de soldadura, el cual tiene la función de regenerar los sectores dañados de los álabes; producto del desgaste por factores corrosivos durante su funcionamiento, como lo son la cavitación y la erosión.

Para este proceso se necesita realizar un tratamiento térmico posterior al trabajo de soldadura, y de esta forma eliminar tensiones moleculares de los elementos ya que álabes con problemas de fragilidad serían catastróficos para el trabajo de las turbinas. Es necesario tratar las piezas térmicamente en un horno lo suficientemente capaz de llevar las piezas a la temperatura deseada sin problemas.

La C.N.F.L. tiene problemas con el horno de tratamiento, por lo tanto se basa el proyecto bajo esta situación y se generan las soluciones a implementar bajo modelos virtuales térmicos de transferencia de calor y de análisis estructural aplicados al horno, de esta forma se puede simular mediante valores específicos un entorno donde el horno sea eficiente según lo requerido y que además pueda ser operado bajo términos aceptables para la seguridad y bienestar de los trabajadores.

**REDESIGN OF AN OVEN FOR STRESS RELIEF POST WELDING, COMPAÑÍA
NACIONAL DE FUERZA Y LUZ**

By Asdrúbal Miranda Calderón

Fabiana Jiménez Chinchilla

Javier Carazo Berrocal

(JANUARY 26TH 2016)

ABSTRACT

The mechanical maintenance section of hydroelectric plants from the *Compañía Nacional de Fuerza y Luz* makes a repair work on rotating elements of the turbine by means of a welding process, which serves to regenerate damaged parts of the blades; product of corrosive wear factors during operation, such as cavitation and erosion.

For this process it needs to be performed a post-weld heat treatment work, and thus eliminate the molecular stresses from the elements, because fragility problems in the turbine blades would be catastrophic for their operation. The parts need to be treated thermally in an oven capable enough to bring them to the desired temperature without problems.

C.N.F.L. have problems with treating furnace, so the project is based on dealing with this situation and offer solutions to implement low thermal virtual models of heat transfer and structural analysis applied to the furnace, the specific values can be simulated generating an environment where the oven is efficient as required and also can be operated under acceptable terms for the safety and welfare of workers.

1 Introducción

En este trabajo se proponen una serie de mejoras para un horno industrial destinado a tratamiento térmico de componentes de acero de manera que se puedan controlar mejor las curvas de calentamiento y enfriamiento efectivas. Este trabajo documenta la justificación de las decisiones de diseño y la cuantificación del rendimiento actual y el esperado para el horno del Taller Anonos, de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, ubicada en San José, Costa Rica.

En esta sección introductoria se presentan las generalidades del trabajo, así como una síntesis de la metodología de trabajo que se adoptó para este caso particular.

1.1 Objetivo general

Aumentar en al menos un veinte por ciento la eficiencia de un horno para alivio tensiones destinadas a piezas de geometrías propias de rodetes para turbinas hidráulicas tipo Francis.

1.2 Objetivos específicos

- Estudiar los distintos tipos de hornos empleados para realizar tratamientos térmicos y ubicar el horno en estudio en las categorías correspondientes.
- Determinar los parámetros de operación actuales del horno, en particular las tasas de calentamiento y de enfriamiento y la temperatura máxima alcanzable.
- Evaluar las condiciones actuales de las paredes internas, incluyendo tipo y espesor del material refractario.
- Caracterizar el tipo de pieza que se espera procesar y los perfiles de temperatura en el tiempo que se desean obtener.
- Seleccionar y distribuir las resistencias eléctricas y ventiladores para difundir uniformemente la energía térmica en el interior del horno.
- Diseñar un mecanismo para la compuerta del horno que asegure buen sello térmico.
- Elegir los materiales y diseños de las bandejas para las piezas que presenten buena durabilidad a ciclos de dilatación térmica.

1.3 Justificación y antecedentes

La sección de Mantenimiento Mecánico de Plantas Hidroeléctricas de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (conocido más popularmente como taller Anonos) tiene entre sus labores regulares el proceso de *recargue* (adición de material en zonas desgastadas) de piezas por medio de un proceso de soldadura. Este proceso se hace en varios elementos que pertenecen a componentes mecánicos de las plantas hidroeléctricas y que se han desgastado por corrosión, cavitación y erosión. La labor de recargue de las piezas se realiza con el fin de restaurar el espesor de los componentes hidráulicos y otorgarle el acabado para su operación aceptable.

Posterior al proceso de recargue, las partes deben ser sometidas a una fase de alivio de los esfuerzos residuales producto del proceso de soldadura. Este tratamiento térmico se hace en un horno diseñado para ese fin, y es uno de los equipos activos del taller en mención.

Desde su puesta en marcha el horno ha presentado problemas y dudas referentes a su funcionamiento y a los resultados logrados en las piezas. Dentro de los inconvenientes exhibidos, se encontró que el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura máxima deseada resultó ser mayor que el estimado. Además, una vez que se alcanza esta temperatura se presentan fluctuaciones que se traducen en una inestabilidad térmica en la pieza y que, dependiendo del tipo de material tratado, puede representar un tratamiento térmico poco eficaz.

Es por esta razón que se hicieron previo a este trabajo estudios de metalografía a probetas testigo, las cuales evidenciaron fallas asociadas a que no se lograban por tiempo suficiente las temperaturas necesarias y tampoco había garantía de que la temperatura del interior fuera suficientemente homogénea. En suma, era necesario un reacondicionamiento del horno para hacer mejor uso de la energía eléctrica que consume y garantizar tratamientos térmicos en el ámbito de temperatura y velocidades de calentamiento y de enfriamiento prácticas.

Esta mejora en la precisión de operación es clave para la certificación de calidad de los trabajos realizados en el taller, ya que garantizaría confiabilidad y repetibilidad de los procedimientos que se traducen en que las piezas tratadas tendrán la resistencia mecánica de diseño.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de la investigación y el posterior diseño y mejoras propuestas al horno, se recurrió a distintas fuentes, que sirvieron de guía para la ejecución del trabajo final de graduación.

- Se realizaron visitas al taller Anonos de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) con el fin de caracterizar el horno que utilizan actualmente para realizar los alivios de tensiones.
- Se entrevistó a funcionarios del taller Anonos, específicamente al personal responsable de operar el horno, para conocer con más detalle las desventajas e inconvenientes que presenta en su funcionamiento, y asimismo para comentar los requerimientos que tienen con el propósito de tener un punto de partida para su mejora.
- Se determinó el procedimiento general de operación del horno de acuerdo con las informaciones brindadas por los funcionarios del taller, así como su configuración física, con ayuda de instrumentos de medición utilizados por los autores.
- Se utilizaron datos históricos brindados por el taller Anonos, respecto a los materiales, dimensiones y pesos de los componentes que llevan tratamientos térmicos en el horno, para definir el espacio interior necesario según la incidencia de la demanda.
- Se elaboró el balance energético del horno en las condiciones actuales de operación mediante un análisis de masas térmicas concentradas en estado transitorio. La solución numérica de las ecuaciones se hizo con el lenguaje de programación MatLab v.6.2.
- Se determinó el espacio físico disponible en planta para el horno y la carga eléctrica permisible para la instalación. También se realizó un inventario de aquellos componentes del horno actual que pudieran ser reutilizados con el propósito de reducir los costos de inversión inicial.
- Se estudiaron varias opciones de configuración nuevas en cuanto a la estructura física del horno y aislamiento. Esto se hizo con base en publicaciones previas y entrevistas con expertos y operadores en el área.
- Se visitó a varios establecimientos que podrían proveer los materiales y equipos con el fin de obtener especificaciones base para los cálculos pertinentes.
- Se propuso una nueva configuración de resistencias eléctricas en el interior del horno para incrementar su eficiencia, fundamentado en cálculos matemáticos y con datos obtenidos por los autores del proyecto.

- Se calcularon con un modelo de resistencias térmicas equivalentes las pérdidas de calor, considerando los materiales utilizados en su fabricación en la condición de operación actual y una nueva propuesta.
- Se cuantificaron los periodos de calentamiento y la magnitud de las pérdidas en la configuración térmica propuesta para determinar la condición de operación futura y compararla con la actual.
- Con modelos térmicos concentrados en estado transitorio, se usaron métodos numéricos para simular el diseño actual y propuesto del horno, para cerciorarse que los materiales a utilizar en el acondicionamiento del mismo en realidad entreguen los resultados esperados.
- Se propuso un nuevo mecanismo para abrir y cerrar la puerta del horno que fuera de fácil manejo y que no represente un peligro para el operador.
- Se calcularon reacciones y esfuerzos locales en la estructura propuesta para la puerta con el programa de modelado estructural SAP 2000

1.5 Alcance y limitaciones

El desarrollo de este trabajo tiene como fin principal el rediseño de un horno que cumpla con los requisitos y especificaciones que el *Taller Anonos* precisa para su adecuado funcionamiento.

Se espera satisfacer las necesidades que se tienen actualmente con el horno en cuestión, dentro de las cuales destacan: un diseño que permita un aislamiento térmico adecuado, donde no se presenten fugas hacia el exterior que se traduzcan en pérdidas de temperatura e ineficiencia del equipo. Asimismo, se quiere mantener una temperatura constante, con carga, de 600°C, sin que se presenten fluctuaciones durante el tiempo que tarde el proceso de alivio de tensiones.

Este documento es un conjunto de diseños unitarios, que individualmente contribuyen a mejorar las condiciones de trabajo de un horno para alivio de tensiones y los componentes que este requiere para su óptimo funcionamiento. No queda implícito un análisis exhaustivo sobre tratamientos térmicos y alivio de tensiones en sí.

Los aspectos puntuales que comprende este proyecto, entiéndase cálculos, análisis y resultados, se refieren exclusivamente al horno destinado al alivio de tensiones del taller Anonos, tomando como base las características físicas y de operación del mismo. Cualquier uso de los datos especificados en este proyecto para otro horno no van a garantizar un desempeño adecuado, y es por esta razón que, en el eventual caso de querer ejecutar una propuesta para otro horno industrial, se recomienda llevar a cabo un análisis desde el comienzo dado que cada pieza merece un estudio distinto.

Existe amplia variedad de hornos que sirven para los procesos de alivio de tensiones, no obstante, para este trabajo, el enfoque se dirige exclusivamente a los hornos de bache tipo caja (ver sección 3.3.1 para una explicación). La razón para esto radica en que el horno que se tiene en el *Taller Anonos* es de tipo bache, y se pretende utilizarlo como base para el nuevo diseño, y esto implica no variar sus dimensiones ni el tipo de horno.

El enfoque del proyecto se basa en propuestas realistas que toman en consideración los recursos disponibles tales como el espacio físico, instalación electromecánica y, equipo de toma de datos de operación del horno.

No se incluye en el documento una estimación de la inversión necesaria ni de especificaciones detalladas para poner en marcha la propuesta, dado que no es parte de sus objetivos. En caso de querer poner en práctica la realización de los diseños aquí mencionados, deberá iniciarse el proceso de cotizaciones en el contexto de tiempo y del modelo de contratación y adquisición de bienes y servicios de la C.N.F.L.

En cuanto las licencias de los software utilizados para este trabajo cabe mencionar que se utilizaron las licencias con las que cuenta la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica para los paquetes MatLab y AutoCad. En cuanto al programa SAP 2000 se utiliza la licencia con la que cuenta el Programa de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

2 Marco teórico

En este capítulo se presentan los principales conceptos teóricos que fundamentan el análisis y mejora del horno. Se cubren los tópicos de esfuerzos residuales, tratamientos térmicos convencionales para materiales ferrosos, y las ecuaciones generalizadas de transferencia de calor en estado transitorio multidimensional para el caso de sistemas térmicos concentrados. Se pretende con esto tener una base suficientemente clara para comprender las técnicas aplicadas en la ejecución del proyecto y complementar los conocimientos especiales para el área.

2.1 Esfuerzos residuales en materiales metálicos

2.1.1 Definición y origen del fenómeno

Se pueden definir las tensiones residuales como cualquier esfuerzo remanente en un cuerpo elástico que se encuentre libre de fuerzas o restricciones externas y de cambios o gradientes de temperatura. Si esta distribución de esfuerzos no es homogénea, pueden ocasionar deformaciones heterogéneas del material lo que provoca que pierda su geometría original. Por otra parte las deformaciones internas desiguales generan acción cortante local que se transformarán en fisuras, que crecerán hasta ser grietas que, con el paso del tiempo se traducirán en grietas en el continuo de la pieza.

Las tensiones residuales en soldadura, como bien lo dice su nombre, son tensiones mecánicas que se generan en las piezas como resultado de las deformaciones plásticas localizadas producidas por expansiones y contracciones no uniformes del metal de soldadura y metal base adyacente. Estas expansiones y contracciones corresponden a las resultantes de tracción y compresión de material.

La compresión resultante corresponde a la que produce una reducción de volumen equivalente a la acción de impedir desplazamiento. Es decir, cuando la máxima temperatura alcanzada en la pieza, no exceda de cierto valor, dicha tensión se encontrará en el campo elástico. En el caso de una unión soldada, en la zona de afectada por calor, donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra.

Por otro lado, el proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de tracción. En las piezas, al haber alcanzado finalmente la temperatura ambiente, habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

Para poder comprender el fenómeno anteriormente mostrado, se muestra la siguiente ilustración que ejemplifica las variaciones que se producen en una barra central.

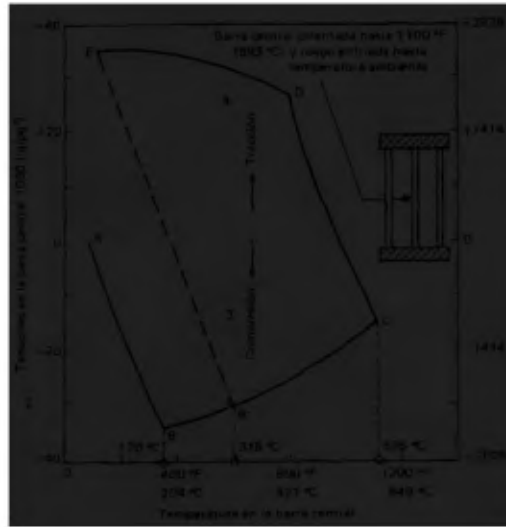


Ilustración 2.1 Fenómeno de Tensiones Residuales en Soldadura

Fuente: [CITATION Lar09 \l 5130]

De la ilustración anterior se observa que al calentar únicamente la barra central aparecen esfuerzos axiales de compresión dado que su dilatación está restringida por dos barras laterales. En la curva A-B, es evidente que se alcanza el límite de fluencia del metal de la barra en el punto "B" (alrededor de los 170°C). Por otra parte, los esfuerzos de compresión en la barra se reducen según la variación del límite de fluencia del metal con las temperaturas crecientes, lo que se muestra en el tramo de curva B-C.

Una vez que se alcanza la temperatura máxima de aproximadamente 600°C correspondiente al punto "C" comienza el enfriamiento de la barra, las tensiones de compresión decaerán rápidamente y la tensión cambia de signo hasta alcanzar el punto "D" correspondiente a la tensión de fluencia. Conforme baja la temperatura, la tensión en la barra va cambiando puesto que iguala el límite de fluencia para esa temperatura particular. De esta forma, habrá quedado sometida a una tensión residual de tracción igual al límite de fluencia del metal a temperatura ambiente. Para mantener la condición de equilibrio las tensiones en las barras laterales serán de compresión y su valor será la mitad que la tensión en la barra central. Cabe aclarar que la línea E-B indica que tensiones residuales iguales al límite de fluencia se producirá calentando la barra central a cualquier temperatura que exceda aproximadamente los 315°C.

Este proceso se repite localmente en cualquier pieza susceptible a calentamiento diferenciado, como es el caso de una pieza de acero calentada por convección o radiación. En suma, cuando el componente se enfría, habrá zonas con deformaciones plásticas con tensiones residuales de valor igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente.

Cuando se unen dos o más piezas mediante un cordón de soldadura ocurren fenómenos similares a los explicados mediante el clásico sistema de las tres barras, donde coincide el cordón con la barra central y el metal base con las barras laterales. Los fenómenos térmicos y de movimiento de expansión y contracción se pueden dividir en cuatro secciones que se muestran en la siguiente ilustración.

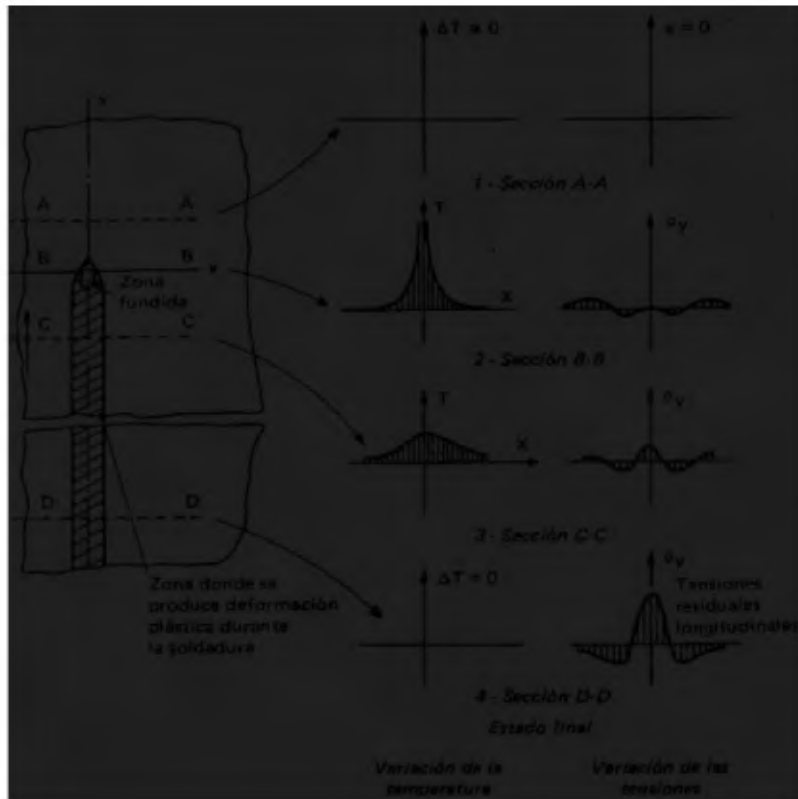


Ilustración 2.2 Estados transitorios y finales durante la soldadura

Fuente: [CITATION Lar09 \l 5130]

La ilustración 2.2 esquematiza el proceso de soldadura suponiendo que el arco se mueve en la dirección indicada (flechas en la figura), se pueden observar las siguientes secciones de dicho fenómeno transitorio:

La **sección A-A** se ubica justamente por delante de la fuente de calor; todavía no ha experimentado perturbación alguna como consecuencia del arco situado en "B", por lo tanto su temperatura será la inicial " T_0 " y la pieza se encuentra libre de tensiones residuales atribuibles a ese arco.

La **sección B-B** se ubicada en el centro del arco. Este experimenta un súbito crecimiento de temperatura hasta alcanzar el valor máximo, se produce la elevación de temperatura de las zonas adyacentes. Este aumento de temperatura provoca la dilatación de las masas y

consecuentemente aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al metal fundido. En las áreas más alejadas y frías, aparecen tensiones de tracción para mantener el equilibrio de esfuerzos de la pieza. El metal fundido carece de resistencia mecánica, por lo que en el centro de la soldadura la tensión tendrá valor cero.

La **sección C-C** inicia tan pronto como pase el arco comenzará la evacuación del calor hacia el resto de la pieza con lo que descenderá la temperatura de la zona calentada por este. En lo que respecta al estado de tensiones, se observa que, al enfriarse las zonas dilatadas, surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor. En zonas alejadas aparecen tensiones de compresión para que se cumpla la condición de equilibrio.

La **sección D-D** se encuentra lo suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total; es por ello que se encontrará a la temperatura inicial de la pieza, y por ende, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales.

Es importante señalar que durante los estados transitorios y en la condición final deben cumplirse las condiciones de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Las tensiones usualmente expresadas en carga de fuerza por área se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

En donde:

P= fuerza de tracción total (N)

A= área de la sección transversal(m²)

Las deformaciones ocurren cuando se aplican cargas y la pieza varía su longitud inicial.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (2)$$

En donde:

Δl = variación de longitud, mm

L_0 = longitud inicial, mm

En los análisis de tensiones se acostumbra asumir que el material es puramente elástico, homogéneo e isotópico (las propiedades del material son las mismas en todas las direcciones) de acuerdo con la ley de Hooke, por lo que las deformaciones y tensiones son proporcionales como se muestra a continuación.

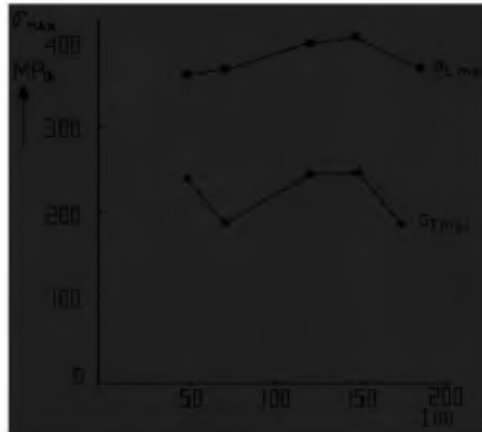


Ilustración 2.3 Relación entre la corriente de soldadura y las tensiones residuales
 Fuente: [CITATION Lar09 \ 5130]

Las tensiones residuales pueden clasificarse tanto por su origen, como producidas por heterogeneidad geométrica o por distribución desigual de las tensiones no elásticas (lo que incluye efectos de plasticidad y por dilatación térmica)



Ilustración 2.4 Factores que contribuyen a las tensiones residuales.
 Fuente: [CITATION Lar09 \ 5130]

En la ilustración anterior se muestra la importancia de contemplar ciertas medidas cuando se utiliza el proceso de soldadura, ya sea para construir o reparar para evitar alteraciones en la estructura macroscópica de la pieza o la microestructura del material.

Las tensiones residuales afectan en forma significativa a fenómenos que suceden a bajos niveles de aplicación de tensión, lo que incluye los siguientes tipos de falla:

- Fractura frágil
- Fisuración por tenso-corrosión.¹
- Decremento de la carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico
- Carencia de estabilidad dimensional después del mecanizado.

2.1.2 Métodos de atenuación

Las tensiones residuales se pueden reducir por vía mecánica o por vía térmica, dependiendo de la geometría del componente y la microestructura requerida del material de la pieza. En esta sección se caracterizan estas metodologías en términos generales.

Alivio de tensiones por carga directa

Este método es realizable cuando la pieza posee características de ductilidad relativamente altas. Ocurre una redistribución de las tensiones residuales al aplicar y remover tensiones externas. Al emplear este método, se puede apreciar la disminución del nivel de tensiones residuales que se logra. También, es posible comprobar que la prueba hidráulica practicada en la recepción de recipientes sometidos a presión interior, tiene, indudablemente, el efecto de un alivio de tensiones por vía mecánica.

Este método de alivio de tensiones es aplicable a conjuntos de dimensiones reducidos quedando limitado el tamaño de las piezas a tratar por la capacidad dimensional y de fuerza, disponible en los dispositivos de estiramiento.

Martillado de los cordones de soldadura

Es un método por vía mecánica que consiste en golpear cada cordón de soldadura con una masa pesada y golpes lentos. El empleo de una masa liviana y golpes rápidos endurece la superficie del metal, ya que no se logran deformaciones profundas, sino que fragiliza la cáscara del metal sin aliviar la tensión. En esencia, desde que la soldadura se halla en estado de tracción, si el metal es desplazado plásticamente en dirección del espesor, fluirá en el plano perpendicular con lo que se producirá un efectivo alivio de las tensiones longitudinales y transversales.

A pesar de su sencillez y efectividad, no resulta un método de producción recomendable por la imposibilidad de cuantificar sus resultados y de asegurar su uniformidad y repetitividad.

¹ *Tenso-corrosión*, o corrosión bajo esfuerzos de tensión, es el proceso físico-químico a través del cual los metales, cuando están sometidos a esfuerzos mecánicos, simultáneamente con una exposición a ambientes corrosivos, presentan una fatiga estructural que desemboca en la aparición de fisuras y grietas con resultado de una disminución de su resistencia [CITATION CCI14 \l 1046]

Aplicación de vibraciones

Este método consiste en hacer vibrar la pieza mediante un vibrador de velocidad variable. Al variar la velocidad se puede alcanzar la frecuencia de resonancia con la que se mantiene un período de tiempo relacionado con el peso del elemento a tratar, el cual, usualmente varía entre diez y treinta minutos. La energía vibratoria introducida en la pieza reorganiza la estructura de la red cristalina con lo que alivia la tensión. Cabe destacar, que la efectividad del método de alivio de tensiones por vibración puede ser diferente en vibraciones en metales suaves que en metales endurecidos.

Además, para poder tener una exitosa y efectiva aplicación industrial de este método se requieren otras exigencias, como lo son:

1. Una geometría relativamente simple para asegurar una propagación completa de la alta amplitud vibracional.
2. Grandes amplitudes de vibración, con tensiones en el orden de los límites de fatiga del material, deben aparecer para un mayor porcentaje de relajación de las tensiones residuales.
3. El material debe ser del tipo que sea susceptible a la relajación de tensiones por vibración.

En determinadas circunstancias puede que no se logre la eliminación total de las tensiones por este método, pero sí de forma parcial por lo que representaría una alternativa conveniente.

El alivio de tensiones residuales por medio de vibraciones no modifica la estructura metalográfica de la soldadura ni de la zona afectada por el calor, por lo que no deberán esperarse mejoramientos de las propiedades mecánicas de estas zonas al emplear dicha técnica.

En muchas ocasiones no se puede aplicar este método por no cumplir las exigencias para su aplicación. Las estructuras pueden ser complicadas e irregulares y complican la aplicación del mismo.

Alivio de tensiones por vía térmica

Este tratamiento, ampliamente utilizado en la industria, representa el método que se lleva a cabo en el horno a rediseñar, para eliminar las tensiones generadas posteriores a la soldadura. Dicho procedimiento consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo con el propósito que la temperatura sea uniforme en toda la pieza, y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente.

Las temperaturas empleadas para el tratamiento térmico de alivio de tensiones son normalmente de alrededor de 600 °C para los aceros estructurales comunes, y pueden llegar desde unos 650°C hasta unos 700 °C en aceros de alta aleación a base de molibdeno

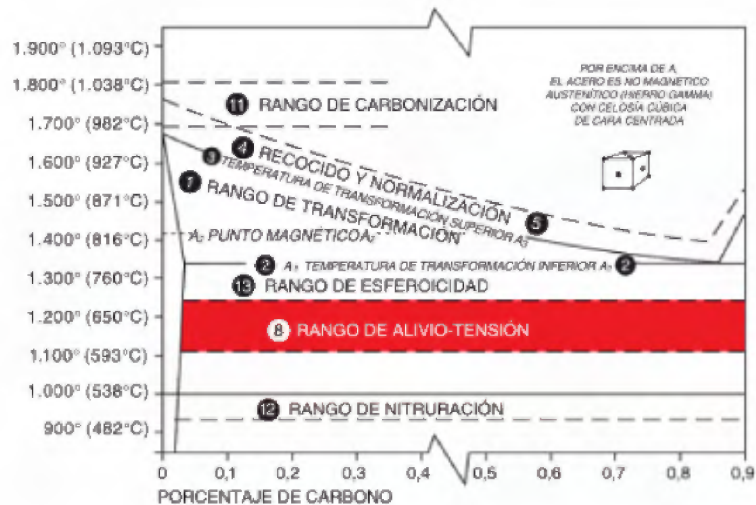


Ilustración 2.5 Ámbito de alivio de tensiones

Fuente: [CITATION Lar09 \l 5130]

En algunos materiales no resulta aconsejable la permanencia a temperaturas del orden indicado por el riesgo de perjudicar su resistencia de trabajo. Independientemente de la estructura metalúrgica, las temperaturas deben de mantenerse por debajo de la temperatura crítica. El rango de temperatura utilizado más comúnmente para aliviar tensiones residuales del acero está entre los 593°C y los 620°C. Esta temperatura es suficiente para disminuir las tensiones residuales hasta en un 90% de su estado inicial pero no tanto como para provocar variaciones en la microestructura de la mayoría de los aceros.

El tiempo que permanece expuesta la pieza o mecanismo a estas temperaturas es un factor determinante, ya que toma cierto tiempo el que la soldadura llegue a dicha temperatura. Una hora en la temperatura resulta un valor demasiado bajo y ocho horas se traduce en costes de producción relativamente altos para un proceso determinado. De todas maneras, cada elemento que va a ser tratado se debe de manipular específicamente o como un elemento individual. Otro factor de gran peso es la velocidad de enfriamiento, ya que, el enfriar rápidamente la estructura puede dar como resultado un enfriamiento disparado y causaría, en los mejor de los casos, una serie de tensiones residuales; y en los peores de los casos un agrietamiento de la pieza.

Por lo anteriormente expuesto, se puede concluir que el alivio de tensiones por vía térmica presenta ventajas y desventajas, ya que para llevarlo a cabo es necesario contar con instalaciones complejas y de alto consumo de energía eléctrica, máxime que está limitado el tamaño de piezas.

Hay que tener en cuenta que el tipo de material, así como las temperaturas que se deben alcanzar y la velocidad de enfriamiento varían de una pieza a otra y no es algo que se puede generalizar. Es importante dado que es para evitar su fragilización o la corrosión intercrystalina, lo que degrada las propiedades mecánicas del material.

2.2 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos, en general, son operaciones de calentamiento y enfriamiento de los metales o aleaciones, a temperaturas y velocidades variables, mediante los cuales se persigue variar la estructura cristalina, presencia de distintas fases sólidas en cantidad, distribución o proporción sin alterar su composición química. A ciertas temperaturas, un tratamiento térmico puede hacerse para reducir tensiones internas, homogeneización de las estructuras de moldeo y afinamiento del grano.

Los tratamientos térmicos en aceros, adquieren gran variedad de matices, lo que permite obtener el máximo rendimiento en función de su aplicación. Dentro de esta categoría de tratamientos térmicos fundamentales se encuentran el recocido, el temple y el revenido.

2.2.1 Recocido

El proceso de recocido consiste en el calentamiento del acero a la temperatura adecuada durante un tiempo determinado, luego se mantiene esta temperatura por un lapso de tiempo y posteriormente se enfría lentamente ya sea en el interior del horno o en algún material aislante del calor. De acuerdo con las propiedades exigidas del material se emplean diferentes procedimientos de recocido.

El propósito general del recocido es refinar el grano, proporcionar suavidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas y, en algunos casos, mejorar el maquinado. Asimismo, el recocido se utiliza para eliminar esfuerzos residuales producto de procesos de trabajo en frío y/o un fuerte maquinado.

2.2.2 Templado

El temple es un tratamiento térmico en el cual el acero es calentado hasta temperaturas de austenización, para posteriormente ser enfriado rápidamente, con el propósito de obtener una transformación que proporcione una estructura martensítica dura y resistente. La austenita es el constituyente más denso de los aceros, es una forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono. No es estable a temperatura ambiente, excepto en aceros fuertemente aleados como lo son algunos inoxidable, se alcanza la fase austenítica por lo general en rangos de temperatura que van desde los 900°C a los 1400°C.

Por otro lado, la martensita es la fase cristalina que se obtiene en aleaciones ferrosas. Esta fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión a una velocidad muy cercana a la del sonido en el material. Los aceros con microestructura martensítica son los más duros y más resistentes mecánicamente, pero son a su vez los más frágiles y menos dúctiles.

2.2.3 Revenido

El revenido consiste en calentar la pieza entre la temperatura ambiente y la de transformación, según el acero a tratar, y tiene como fin disminuir la elevada fragilidad producto del temple anterior, así como proporcionar a los aceros cierta tenacidad. Es importante que el revenido se lleve a cabo inmediatamente después del temple.

La mayor tenacidad de las piezas revenidas tiene generalmente como consecuencia una cierta disminución de la dureza conseguida durante el templado. El efecto del revenido depende de la aleación del acero, del temple, del espesor de la pieza y del tratamiento aplicado, el efecto que tenga este tratamiento será más fuerte para piezas de acero poco aleado, de dimensiones delgadas y de mayor contenido de carbono.

El revenido no tiene influencia sobre la dureza, pero disminuye o elimina las tensiones producidas por el temple si se mantiene la pieza durante un tiempo prolongado a cierta temperatura. Cuando se pretende aumentar la tenacidad del acero, con su correspondiente disminución de dureza, se lleva a cabo en el rango de 200°C a 300°C, dependiendo el valor escogido de la calidad del acero, geometría y aplicación para la cual será destinada. En el caso de los aceros rápidos se utilizan temperaturas de 550°C a 650°C, y en estos casos se produce un aumento en la dureza de los mismos.

2.2.4 Tratamiento térmico de los aceros martensíticos

El tratamiento térmico que se lleva a cabo en este taller para las piezas que se mencionan en el trabajo, corresponden a un temple y revenido típico para aceros martensíticos. Para el temple se calienta la pieza a una temperatura comprendida entre 980°C y 1035°C y se mantiene en ese estado hasta garantizar que esta se haya homogenizado.

El posterior revenido de la pieza es según la composición de la misma, dado que se puede obtener una gran variación en las propiedades mecánicas de estos aceros calentándolos nuevamente en el ámbito desde los 540°C hasta los 810°C. El revenido a temperaturas comprendidas entre 450°C y 540°C debe evitarse, por cuanto produce una disminución en la resistencia al impacto de los aceros.

La velocidad de enfriamiento posterior al revenido no afecta las propiedades mecánicas de interés [CITATION Geo61 \l 5130].

Se indican en el cuadro 2.1 las características y condiciones para el templado y revenido de distintos tipos de acero.

Cuadro 2.1 Procedimientos de temple y revenido de aceros inoxidables martensíticos, niveles de resistencia y dureza alcanzadas

Tipo	Temp. de austenización, °C	Medio de temple	Temp. de revenido, °C		Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza (HRc)
			Min	Máx		
403, 410	930 a 1010	Aire o aceite	560	600	760 a 960	25 a 31
			200	370	1100 a 1500	38 a 47
414	930 a 1050	Aire o aceite	600	650	760 a 1500	25 a 31
			230	370	1100 a 1500	38 a 49
416, 416Se	930 a 1010	Aceite	560	600	760 a 960	25 a 31
			230	370	1100 a 1500	35 a 45
420	980 a 1065	Aire o aceite	200	370	1550 a 1930	48 a 56

Fuente: [CITATION Fac \l 5130]

2.3 Principios de la transferencia de calor

La energía se puede transferir hacia una masa dada, o desde ésta, mediante dos mecanismos: calor, denotado como **Q** y trabajo, **W**. Una interacción energética es transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura; de lo contrario, es trabajo. Tanto un pistón que sube, como una flecha rotatoria y un alambre eléctrico que crucen las fronteras del sistema, están asociados con interacciones de trabajo. El trabajo realizado por unidad de tiempo se llama potencia y se denota por **W**.

Los motores de automóviles y las turbinas hidráulicas, de vapor y de gas producen trabajo; los compresores, bombas y mezcladoras consumen trabajo. La energía de un sistema disminuye conforme realiza trabajo y aumenta si se realiza trabajo sobre él.

Se denomina a la energía térmica, calor, y a la transferencia de energía térmica, transferencia de calor. La cantidad de calor transferido durante el proceso se denota por **Q**. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama razón de transferencia de calor y se denota por \dot{Q} . El punto arriba representa la derivada de la magnitud respecto al tiempo. La velocidad de transferencia de calor, tiene la unidad J/s, lo cual es equivalente a **W**.

Cuando se cuenta con la razón de transferencia de calor, entonces se puede determinar la cantidad total de transferencia de calor durante un intervalo de tiempo Δt a partir de

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt (J) \quad (3)$$

2.3.1 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de la energía, expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar de la siguiente manera: El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso.

En el análisis de la transferencia de calor, es usual tener interés únicamente en las formas de energía que se pueden transferir como resultado de una diferencia de temperatura; es decir, el calor o energía térmica. En esos casos resulta conveniente escribir un balance de calor y tratar la conversión de las energías nuclear, química, mecánica y eléctrica hacia energía térmica como generación de calor. En ese caso, el balance de energía se puede expresar con la ecuación 4.

$$Q_{ent} - Q_{sal} + E_{gen} = \Delta E_{termica, sistema} \quad (4)$$

2.3.2 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario

Un gran número de sistemas de ingeniería están asociados a flujos de masa que entran y salen de una frontera definida como un volumen de control. Muchas veces el balance de flujos de masa se puede hacer en condición estacionaria, lo que se asocia a que su contenido total de energía también permanece constante. ($E_{vc} = \text{constante}$). Es decir, el cambio en la energía total del volumen de control durante un proceso de este tipo es cero ($\Delta E_{vc} = 0$). Por tanto, la cantidad de energía que entra en un volumen de control en todas las formas (calor, trabajo, transferencia de masa) para un proceso de flujo estacionario debe ser igual a la cantidad de energía que sale de él.

Para un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida, la velocidad del flujo de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del flujo de masa hacia afuera de él; es decir, $\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} = \dot{m}$. Cuando los cambios en la energía cinética y la energía potencial son despreciables, que es el caso más común, y no se tiene interacción de trabajo, el balance de energía para tal sistema de flujo estacionario se reduce a:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \left(\frac{kJ}{s} \right) \quad (5)$$

En donde \dot{Q} es la diferencia neta entre los flujos de calor que entran al sistema \dot{Q}_e y los que salen del sistema \dot{Q}_s delimitado por volumen de control. La anterior es la forma de relación de balance de energía que se usará con la mayor frecuencia para los sistemas de flujo estacionario.

2.3.3 Mecanismos de transferencia de calor

Se definió el calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía, se denomina, transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir mediante tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Enseñada se da una breve descripción de cada modo.

Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones elásticas entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él, por lo tanto; la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de mayor rapidez cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja.

Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Cuanto más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la razón de transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido y si la

diferencia de temperatura es pequeña, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido incrementa la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es desplazado por algún efecto externo a su estado termodinámico. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de flotación inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación.

A pesar de la complejidad de la convección, para la mayoría de cálculos de ingeniería se puede seguir la observación de que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la Ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty) (W) \quad (6)$$

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $W / (m^2 \cdot ^\circ K)$ o $Btu / (h \cdot ft^2 \cdot R)$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_m es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. En la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, sus propiedades y la distribución de velocidad y grado de turbulencia asociadas.

Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del sol llega a la Tierra.

En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica.

La radiación es un fenómeno volumétrico, y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en Kelvin o Rankine) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$\dot{Q}_{emitada, \text{máx}} = \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \text{ (W)} \quad (7)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/(h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4)$ es la constante de Stefan-Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{entrada} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \text{ (W)} \quad (8)$$

En donde ϵ es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 < \epsilon < 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual la emisividad es unitaria.

Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad α , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él. Es decir, un cuerpo negro es un absorbente perfecto ($\alpha = 1$) del mismo modo que es un emisor perfecto.

En general, tanto ϵ como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absorptividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio. La razón a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de:

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \cdot \dot{Q}_{incidente} \text{ (W)} \quad (9)$$

Donde $\dot{Q}_{incidente}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie. Para las superficies opacas (no transparentes), la parte de la radiación incidente no

absorbida por la superficie se refleja. La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. En general, la determinación de la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies es un asunto complicado, ya que depende de las propiedades de las superficies, de la orientación de una con respecto a la otra y de la interacción del medio que existe entre ellas con la radiación.

2.3.4 Ecuación de la conducción de calor en una pared plana grande

Se considera para este caso un elemento delgado de espesor Δx en una pared plana grande. La densidad de la pared es ρ , el calor específico es C y el área de la pared perpendicular a la dirección de transferencia de calor es A . Un balance de energía sobre este elemento delgado, durante un pequeño intervalo de tiempo Δt , se puede expresar de la siguiente manera:

Ilustración 2. 1 Balance de energía sobre elementos delgados

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{del calor en } x \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción del} \\ \text{calor en } x + \Delta x \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{generación} \\ \text{de calor en} \\ \text{el interior del} \\ \text{elemento} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{cambio del} \\ \text{contenido de} \\ \text{energía del} \\ \text{elemento} \end{array} \right)$$

Fuente: Cengel, 2006)

Dado que el área A es constante para una pared plana, la ecuación unidimensional de conducción de calor en régimen transitorio en una pared de ese tipo para un material de conductividad variable sería:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

En general, la conductividad térmica k de un material depende de la temperatura T (y, por lo tanto, de la posición x) y, por consiguiente, no se puede extraer de la derivada. No obstante, en la mayor parte de las aplicaciones prácticas se puede suponer que la conductividad térmica permanece constante en algún valor promedio. En ese caso, la ecuación antes dada se reduce a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Donde la propiedad $\alpha = k/\rho \cdot C$ es la difusividad térmica del material y representa la velocidad con que se propaga el calor a través del mismo. Ésta se reduce a las formas siguientes en condiciones específicas:

1. Régimen estacionario, $\partial/\partial t = 0$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = 0 \quad (12)$$

2. Régimen transitorio sin generación de calor, $\dot{e}_{gen} = 0$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

3. Régimen estacionario, sin generación de calor, $\partial/\partial t = 0$ y $\dot{e}_{gen} = 0$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (14)$$

Se rempazan las derivadas parciales por derivadas ordinarias en el caso de conducción unidimensional y en estado estable, ya que son iguales cuando dicha función depende de una sola variable, que en este caso es la posición x .

2.3.5 Condiciones de frontera iniciales

Las ecuaciones de conducción de calor antes dadas se desarrollaron aplicando un balance de energía sobre un elemento diferencial en el interior del medio y siguen siendo las mismas sin importar las condiciones térmicas sobre las superficies del medio. Es decir, las ecuaciones diferenciales no incorporan información relacionada con las condiciones sobre las superficies, como la temperatura de la superficie o un flujo específico de calor. Empero, se sabe que el flujo de calor y la distribución de temperatura en un medio dependen de las condiciones en las superficies, y la descripción completa de un problema de transferencia de calor en un medio tiene que incluir las condiciones térmicas en las superficies limítrofes del mismo.

Se deduce que para obtener una solución única para un problema, se necesita especificar más que sólo la ecuación diferencial que lo rige. Es necesario fijar algunas condiciones (como el valor de la función o de sus derivadas en algún valor de la variable independiente) de modo que al forzar a la solución a que satisfaga tales condiciones en puntos específicos, arrojará valores únicos para las constantes arbitrarias y, por tanto, una solución única. Sin embargo, como la ecuación diferencial

no tiene lugar para la información o condiciones adicionales, se necesita suministrarlas por separado en la forma de condiciones iniciales o de frontera.

Por lo tanto, se necesita especificar dos condiciones de frontera para los problemas unidimensionales, cuatro para los bidimensionales y seis para los tridimensionales. Por ejemplo, en el caso de la pared de una casa, se necesita especificar las condiciones en dos lugares (las superficies interior y exterior) ya que, en este caso, la transferencia de calor es unidimensional. Pero en el caso de un paralelepípedo, se necesita especificar seis condiciones de frontera (una en cada cara) cuando la transferencia de calor es significativa en las tres dimensiones.

En coordenadas rectangulares, la condición inicial se puede especificar en la forma general como:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (15)$$

En donde la función $f(x, y, z)$ representa la distribución de temperatura en todo el medio en el instante $t = 0$. Cuando el medio está inicialmente a una temperatura uniforme T_i , la condición inicial de la ecuación 15 se puede expresar como $T(x, y, z, 0) = T_i$. En condiciones estacionarias la ecuación de conducción de calor no contiene derivadas con respecto al tiempo y, por tanto, no se necesita especificar una condición inicial. Las condiciones de frontera que se encuentran con la mayor frecuencia en la práctica son las de temperatura específica, flujo específico de calor, convección y radiación.

Condición de frontera de flujo de calor conocido no nulo

Cuando existe información suficiente acerca de las interacciones de energía en una superficie, puede ser posible determinar la velocidad de transferencia de calor y, por tanto, el flujo de calor (velocidad de transferencia de calor por unidad de área superficial, W/m^2), sobre esa superficie, y se puede usar esta información como una de las condiciones en la frontera. El flujo de calor en la dirección positiva x , en cualquier lugar del medio, incluidas las fronteras, se puede expresar por la ley de Fourier de la conducción de calor como:

$$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} = (\text{flujo de calor en la dirección positiva } x) \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (16)$$

Entonces se obtiene la condición de frontera, en una de las fronteras, al hacer el flujo específico de calor igual a $-k(\partial T/\partial x)$ en esa frontera. El signo del flujo específico de calor se determina por inspección: positivo, si el flujo de calor es en la dirección positiva del eje coordenado y negativo, si lo es en la dirección opuesta.

Fronteras aisladas o de simetría térmica

Es común que, en la práctica, algunas superficies se aíslen con el fin de minimizar la pérdida (o ganancia) de calor a través de ellas. El aislamiento reduce la transferencia de calor pero no lo elimina en su totalidad, a menos que su espesor sea infinito. Sin embargo, la transferencia de calor a través de una superficie apropiadamente aislada se puede tomar como cero, ya que el aislamiento adecuado reduce la transferencia de calor a través de una superficie a niveles despreciables. Por lo tanto, una superficie bien aislada se puede considerar como una con un flujo específico de calor de cero. Entonces, la condición de frontera sobre una superficie perfectamente aislada (en $x = 0$, por ejemplo) es:

$$k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \text{ ó } \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

Es decir, sobre una superficie aislada, la primera derivada de la temperatura con respecto a la variable espacial (el gradiente de temperatura) en la dirección normal a esa superficie aislada es cero. Esto también significa que la función de temperatura debe ser perpendicular a una superficie aislada, ya que la pendiente de la temperatura en la superficie debe ser cero.

Condición de convección de frontera

Es probable que la convección sea la condición de frontera más común encontrada en la práctica, puesto que la mayor parte de las superficies de transferencia de calor están expuestas a un medio y a una temperatura específica. La condición de convección de frontera se basa en un balance de energía superficial expresado como:

Ilustración 2. 2 Balance de energía superficial

$$\left(\begin{array}{l} \text{Conducción de calor} \\ \text{en la superficie en una} \\ \text{dirección seleccionada} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Convección de calor} \\ \text{en la superficie en la} \\ \text{misma dirección} \end{array} \right)$$

Fuente: Cengel, 2006

Para la transferencia de calor unidimensional en la dirección x , en una placa de espesor L , las condiciones de frontera sobre ambas superficies se pueden expresar de la siguiente forma:

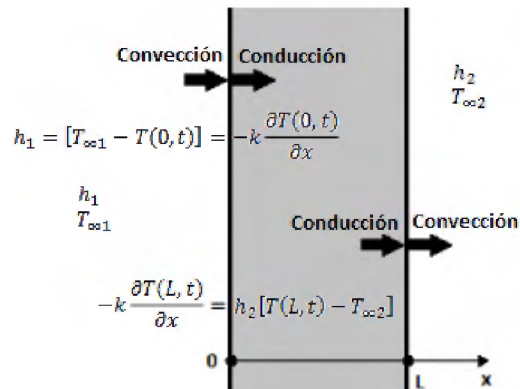
$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h_1 \cdot [T_{\infty 1} - T(0,t)] \quad (18)$$

y

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h_2 \cdot [T(L,t) - T_{\infty 2}] \quad (19)$$

Donde h_1 y h_2 son los coeficientes de transferencia de calor por convección y $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$ son las temperaturas de los medios circundantes sobre los dos lados de la placa, como se muestra en la ilustración 2.6.

Es importante destacar que superficie tiene espesor cero y, por tanto, no tiene masa y es incapaz de almacenar energía. Por lo tanto, todo el calor neto que entra en la superficie desde uno de los lados debe salir de ella por el otro lado. La condición de convección de frontera simplemente expresa que el calor sigue fluyendo de un cuerpo al medio circundante a la misma velocidad y sólo cambia de vehículos en la superficie, de conducción a convección (o viceversa, en la otra dirección).



Fuente: Cengel, 2006.

2.3.6 El concepto de resistencia térmica

La razón de la conducción de calor a través de una pared plana es proporcional a la conductividad térmica promedio, al área de la pared y a la diferencia de temperatura, pero es inversamente proporcional al espesor de la pared. Asimismo, una vez que se cuenta con la razón de la conducción de calor, se puede determinar la temperatura $T(x)$ en cualquier ubicación al remplazar la temperatura y la distancia efectiva. La ecuación para la conducción de calor a través de una pared plana es:

$$\dot{Q}_{cond, pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} (W) \quad (20)$$

Donde,

$$\dot{Q}_{cond, pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} (W) \quad (21)$$

Es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o simplemente la resistencia a la conducción de la pared. Por otra parte, la ecuación dada antes es para la transferencia de calor es análoga a la relación para el flujo de corriente eléctrica I , expresada como:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_e} (A) \quad (22)$$

Donde $R_e = L/\sigma_e$ A es la resistencia eléctrica y $V_1 - V_2$ es la caída de voltaje a lo largo de la resistencia (σ_e es la conductividad eléctrica). Por tanto, la razón de la transferencia de calor a través de una capa corresponde a la corriente eléctrica, la resistencia térmica a la resistencia eléctrica y la diferencia de temperatura a la caída de voltaje en la capa.

La ley de Newton del enfriamiento para la razón de transferencia de calor por convección, $Q_{conv} = hA_s (T_s - T_m)$, se puede reacomodar para obtener la ecuación 23

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}} (W) \quad (23)$$

Donde

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s} \left(\frac{K}{w} \right) \quad (24)$$

Es la resistencia térmica de la superficie contra la convección de calor o, simplemente, la resistencia a la convección de la superficie.

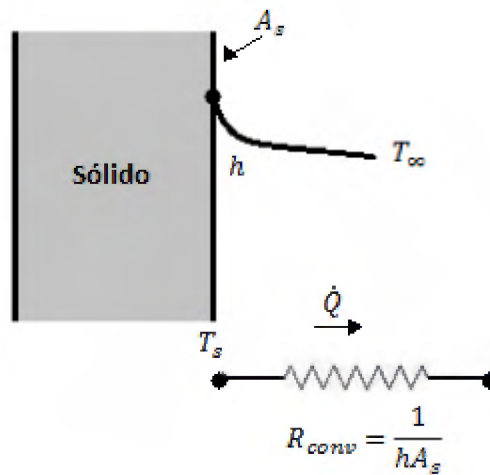


Ilustración 2.6 Esquema para la resistencia a la convección en una superficie

Fuente: Cengel, 2006.

En los casos donde el coeficiente de transferencia de calor por convección es muy grande ($h \rightarrow \infty$), la resistencia a la convección se hace cero y $T_s \approx T_\infty$. Es decir, la superficie virtualmente no ofrece resistencia a la convección y, por tanto, no afecta mucho el proceso de transferencia de calor. Se tiende a esta situación en la práctica en las superficies en donde hay procesos de ebullición o de condensación. La ecuación para la resistencia a la convección es válida para superficies de cualquier forma, siempre que sea razonable la suposición de que el coeficiente de convección es constante y uniforme.

Cuando la pared está rodeada por un gas, los efectos de la radiación, los cuales se han ignorado hasta ahora, pueden ser significativos y es posible que sea necesario considerarlos. La razón de la transferencia de calor por radiación entre una superficie de emisividad s y área A_s , que está a la temperatura T_s , y las superficies circundantes a alguna temperatura promedio T_{alred} se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) = h_{rad} A_s (T_s - T_{alred}) = \frac{T_s - T_{alred}}{R_{rad}} (W) \quad (25)$$

Donde,

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s} \left(\frac{K}{W} \right)$$

es la resistencia térmica de una superficie contra la radiación, o bien, la resistencia a la radiación y

$$h_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{A_s (T_s - T_{alred})} = \epsilon \sigma (T_s^2 + T_{alred}^2) (T_s + T_{alred}) \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (26)$$

es el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Tanto T_s como T_{alred} deben estar en Kelvin en la evaluación de h_{rad} . La definición del coeficiente de transferencia de calor por radiación permite expresar la radiación en forma conveniente, de manera análoga a la convección, en términos de una diferencia de temperatura. Pero h_{rad} depende con intensidad de la temperatura, en tanto que, por lo común, h_{conv} no depende de ella.

Una superficie expuesta al aire circundante comprende convección y radiación de manera simultánea y la transferencia de calor total en la superficie se determina al sumar (o restar, si tienen direcciones opuestas) las componentes de radiación y de convección. Las resistencias a la convección y a la radiación son paralelas entre sí, y pueden provocar algunas complicaciones en la red de resistencias térmicas. Cuando $T_{alred} \approx T_{\infty}$, el efecto de radiación se puede tomar en cuenta de manera apropiada al reemplazar h en la relación de la resistencia a la convección por:

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad} \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad (27)$$

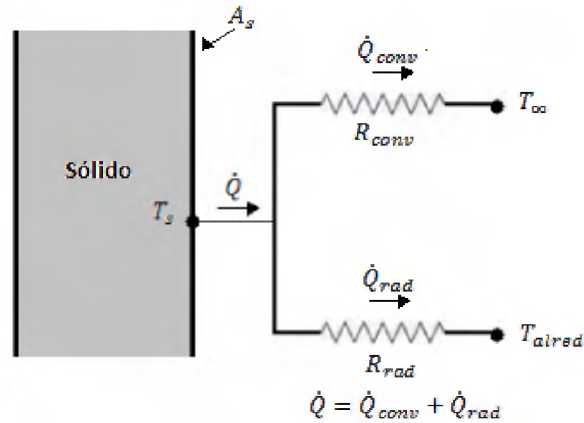


Ilustración 2.7 Esquema para la resistencia a la convección y radiación en una superficie

Fuente: Cengel, 2006

Donde $h_{\text{combinado}}$ es el coeficiente de transferencia de calor combinado. De esta manera, se evitan todas las complicaciones asociadas con la radiación.

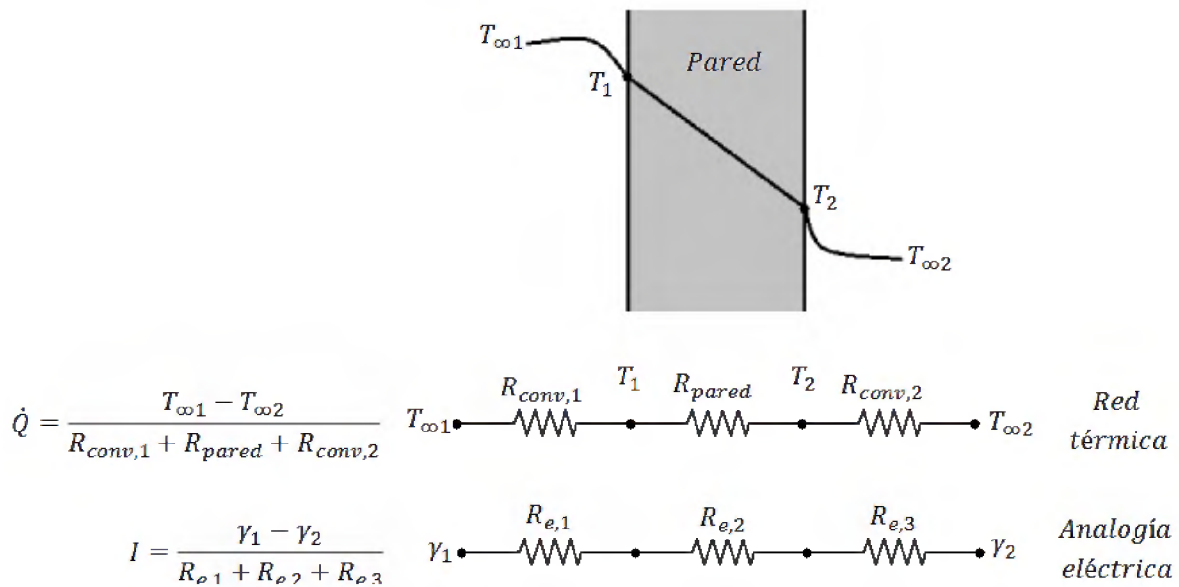


Ilustración 2.8 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared sujeta a convección sobre ambos lados y la analogía eléctrica.

Fuente: Cengel, 2006.

2.3.7 Red de resistencias térmicas

Se considera ahora la transferencia de calor unidimensional en estado estacionario a través de una pared plana de espesor L , área A y conductividad térmica k que está expuesta a la convección sobre ambos lados hacia fluidos a las temperaturas $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, con coeficientes de transferencia de calor h_1 y h_2 , respectivamente. La temperatura varía en forma lineal en la pared y tiende asintóticamente a $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, en los fluidos, a medida que se aleja de la pared. En condiciones estacionarias, se tiene

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{hacia la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{conducción de calor} \\ \text{a través de la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{desde la pared} \end{array} \right)$$

Ilustración 2. 3 Razones de convección y conducción de los elementos

Fuente: Cengel, 2006.

Es decir,

$$\dot{Q} = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (28)$$

La cual se puede reacomodar como:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv,1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{R_{conv,2}} \quad (29)$$

Al sumar los numeradores y los denominadores,

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} (W) \quad (30)$$

Donde,

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{pared} + R_{conv,2} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \left(\frac{^\circ C}{W} \right) \quad (31)$$

La sección transversal A de la transferencia de calor es constante para una pared plana y la razón de esa transferencia a través de una pared que separa dos medios es igual a la diferencia de temperatura dividida entre la resistencia térmica total entre los medios. Las resistencias térmicas están en serie y la resistencia térmica equivalente se determina simplemente al sumar cada una de las resistencias, precisamente como en las resistencias eléctricas conectadas en serie. Por tanto, todavía se aplica la analogía eléctrica. Se resume esto al expresar: la rapidez de la transferencia de calor estacionaria entre dos superficies es igual a la diferencia de temperatura dividida entre la resistencia térmica total entre esas dos superficies.

$$\Delta T = \dot{Q} R \left(^\circ C \right) \quad (32)$$

Esta ecuación indica que la caída de temperatura a través de cualquier capa es igual a la razón de la transferencia de calor multiplicada por la resistencia térmica de esa capa.

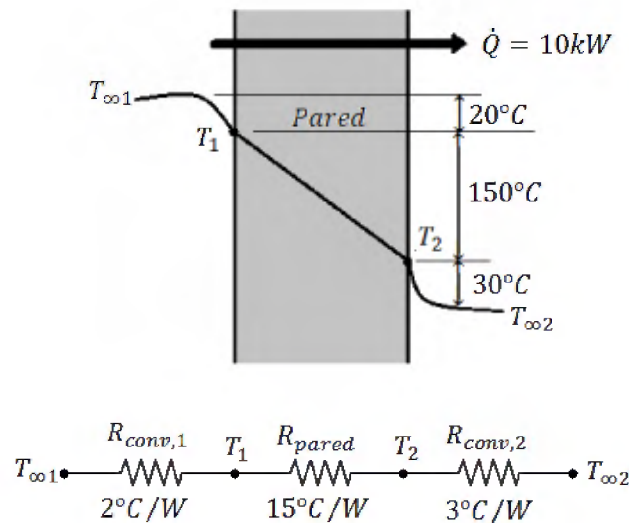


Ilustración 2.9 Caída de temperatura a través de una capa es proporcional a su resistencia térmica

Fuente: Cengel, 2006.

No es necesario conocer las temperaturas superficiales de la pared para evaluar la razón de la transferencia de calor estacionaria a través de ella. Todo lo que se necesita conocer son los coeficientes de transferencia de calor por convección y las temperaturas de los fluidos en ambos lados de la pared. La temperatura superficial de esta última se puede determinar cómo se describió

antes al aplicar el concepto de resistencia térmica, pero se toma la superficie a la cual se le va a determinar la temperatura como una de las superficies terminales. Por ejemplo, una vez que se evalúa Q , se puede determinar la temperatura superficial T_x a partir de

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv,1}} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{1/h_1 A} \quad (33)$$

2.3.8 Paredes planas de capas múltiples

En la práctica, a menudo se encuentran paredes planas que constan de varias capas de materiales diferentes. Todavía se puede usar el concepto de resistencia térmica con el fin de determinar la razón de la transferencia de calor estacionaria a través de esas paredes compuestas. Es decir, al dividir la diferencia de temperatura que existe entre las dos superficies a las temperaturas conocidas entre la resistencia térmica total que presentan ambas.

Se considera una pared plana que consta de dos capas. La razón de la transferencia de calor estacionaria a través de esta pared compuesta de dos capas se puede expresar como (Ilustración 2.13)

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (34)$$

Donde R_{total} es la resistencia térmica total, expresada como

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{pared,1} + R_{pared,2} + R_{conv,2}$$

$$\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (35)$$

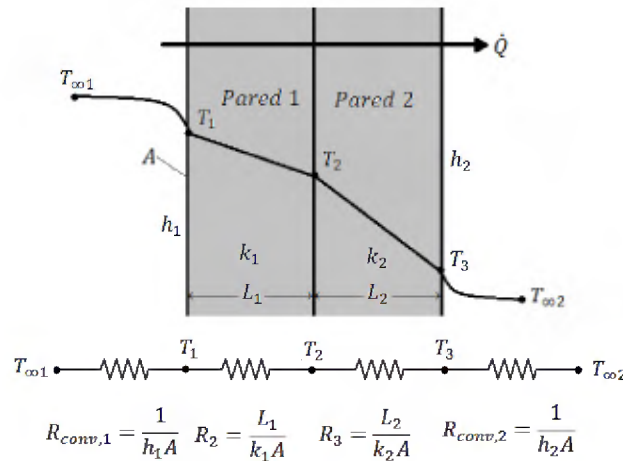


Ilustración 2.10 Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared plana de dos capas sujeta a convección sobre ambos lados

Fuente: Cengel, 2006.

Los subíndices 1 y 2 en las relaciones R_{pared} antes dadas indican la primera y la segunda capas, respectivamente. También se pudo obtener este resultado al seguir el procedimiento utilizado antes para el caso de una sola capa, al notar que la razón de la transferencia de calor estacionaria, a través de un medio de capas múltiples es constante y, por consiguiente, debe ser la misma a través de cada una de las capas. A partir de la red de resistencias térmicas, que dichas resistencias están en serie y, por tanto, la resistencia térmica total es simplemente la suma aritmética de cada una de las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria de la transferencia de calor.

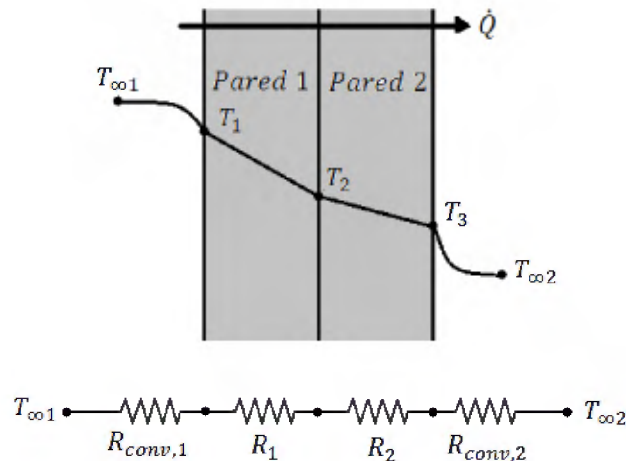
Este resultado para el caso de dos capas es análogo al de una sola capa, excepto en que se suma una resistencia adicional por la capa adicional. Este resultado se puede extender para paredes planas que constan de tres o más capas, al sumar una resistencia adicional por cada capa adicional.

Una vez que se conoce la transferencia de calor por tiempo, se puede determinar una temperatura superficial desconocida T_j en cualquier superficie o interfase j , a partir de la ecuación 36.

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_j}{R_{total,i-j}} \quad (36)$$

Donde T_i es una temperatura conocida en el lugar i y $R_{total,i-j}$ es la resistencia térmica total entre los lugares i y j . Por ejemplo, cuando se dispone de las temperaturas de los fluidos, $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, para el caso de dos capas mostrado en la ilustración 2.12 y se calcula \dot{Q} , se puede determinar la temperatura T_2 en la interface entre las dos paredes, a partir de

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{R_{conv,1} + R_{pared,1}} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A}} \quad (37)$$



$$\text{Para hallar } T_1: \dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{R_{conv,1}}$$

$$\text{Para hallar } T_2: \dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_2}{R_{conv,1} + R_1}$$

$$\text{Para hallar } T_3: \dot{Q} = \frac{T_3 - T_{\infty 2}}{R_{conv,2}}$$

Ilustración 2.11 Evaluación de las temperaturas superficial y en la interface cuando se dan las temperaturas en los extremos y el flujo de calor

Fuente: Cengel, 2006.

Por lo tanto tomando en cuenta el sistema de resistencias propuesto se puede realizar un modelado experimental sobre el horno de tratamiento térmico que se necesita trabajar, en el cual análogamente se tiene resistencias de conducción, convección, así como temperaturas superficiales, de interface, y capacidad de calentamiento, para cada elemento que lo conforma.

Todo este concepto se puede tomar como base para el modelado para obtener resultados sobre el horno tanto en su condición actual como en condiciones de mejoría propuestas realizando una comparación, determinando las optimizaciones y ventajas que los cambios propuestos tienen sobre el sistema actual. La base del análisis fueron las ecuaciones e ilustraciones mostradas en esta sección, realizando los ajustes necesarios para el caso en estudio.

3 Tecnologías de los hornos de aplicación industrial

En esta sección se presentan conceptos comúnmente utilizados en el campo de hornos industriales, partiendo desde su definición pasando por los campos de aplicación, tipos de hornos, partes, modos de operación, y modos dominantes de transferencia de calor, entre otros. El propósito es introducir el área de estudio de hornos industriales para tratamientos térmicos y asimismo, clasificar el equipo que recibirá mejoras en uno o varios de estos conceptos.

3.1 Definición

Los hornos industriales se utilizan para calentar materiales, piezas o elementos por encima de la temperatura ambiente, al ser colocados estos en su interior. Los propósitos para este calentamiento no siempre son los mismos, por ejemplo:

- Tratar térmicamente para otorgarle ciertas características requeridas.
- Lograr cambios de estado, como la fusión de los metales o la vaporización.
- Recubrir las piezas con otros elementos, lo cual se vuelve relativamente más fácil cuando se hace a temperatura más alta que la ambiente, como por ejemplo, el vitrificado de productos cerámicos.
- Obtener la temperatura requerida para producir reacciones químicas en la pieza, necesarias para obtener un determinado producto.

La temperatura a la que se trabaje en un horno desempeña un papel fundamental en cualquier proceso. Una temperatura elevada torna más blando el metal lo cual lo hace más vulnerable para ser forjado, extruido o laminado. Si esta se eleva aún más, el metal puede llegar a fundirse y se elimina la aspereza del mismo; cuando se lleva a cabo este proceso, seguido de un enfriamiento sin que se produzca ninguna deformación, se conoce como recocido.

En las operaciones industriales se abarcan una gran variedad de temperaturas, que dependen del material que se caliente, así como del objeto del proceso de calentamiento y las operaciones que le sigan.

3.2 Campos de aplicación de los hornos industriales

Los campos de aplicación se pueden clasificar de acuerdo con los diferentes tipos de industrias, de las cuales se citan algunos ejemplos a continuación, junto con una breve indicación de los hornos utilizados o las operaciones realizadas en ellos.

Cuadro 3.2 Campos de aplicación de hornos industriales

Campos de Aplicación	Tipos de Hornos
Industria siderúrgica	<ul style="list-style-type: none"> ● Hornos altos de reducción de material de hierro. ● Convertidores de acero. ● Hornos de arco para fusión de chatarra. ● Hornos de tratamientos térmicos de barras, redondos, chapas, perfiles, bobinas, entre otros. ● Hornos de fabricación de ferroaleaciones
Industria del aluminio	<ul style="list-style-type: none"> ● Hornos de fusión y mantenimiento a partir de chatarra o aluminio fundido. ● Hornos de recalentar placas o redondos para laminación o extrusión. ● Hornos de tratamientos térmicos, principalmente recocido. ● Equipos auxiliares, tales como: atmósferas controladas para tratamientos térmicos, precalentadores de matrices para extrusión, precalentadores de chatarra, etcétera.
Industria de automoción	<p>Incluye la fabricación de automóviles, camiones, motocicletas, bicicletas y tractores. Esto exige mayor sofisticación en los hornos y más unidades, se tienen por tanto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Hornos de fusión de metales férricos y no férricos. ● Hornos de preparación y pintado de carrocerías. ● Hornos de tratamientos térmicos, prácticamente de todos los tipos posibles debido a la amplia variedad de piezas que existen.
Fundiciones para metales	<ul style="list-style-type: none"> ● Hornos de fusión y mantenimiento. ● Hornos de tratamientos térmicos, continuos o de bache, de los tipos adecuados a la producción, forma de las piezas y temperatura requerida, entre otras. ● Equipos auxiliares, como lo son los hornos de secado de moldes y machos y, en alguna proporción, también atmósferas controladas
Industrias de productos manufacturados	<p>Se encuentran dentro de esta categoría, la fabricación de materiales eléctricos, electrodomésticos, fabricación de piezas mecánicas, entre otras.</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Hornos de recocido de chapa magnética. ● Hornos de soldadura brillante de pequeñas piezas. ● Grandes hornos de recocido para eliminar tensiones residuales en piezas fundidas y soldadas. ● Instalaciones completas formadas por varios hornos para tratamiento de herramientas.
Industria cerámica y del vidrio	<ul style="list-style-type: none"> ● Hornos rotativos para la fabricación de clínker en la industria del cemento. ● Hornos continuos tipo túnel para fabricar piezas cerámicas industriales y hornos intermitentes. ● Hornos de tratamientos térmicos, principalmente de vidrio, pero también aplicable a piezas cerámicas.

Fuente: [CITATION Uni \1 5130]

Dentro de los campos citados anteriormente, el calentamiento por resistencias eléctricas se da en procesos de baja y media temperatura, aproximadamente hasta los 1200°C, y como consecuencia de esto, el número de instalaciones donde se tienen estos hornos, es comparable al de hornos de llamas y superior al de las que utilizan hornos calentados por otros procedimientos, como arco, inducción, alta frecuencia y especiales.

3.3 Hornos para tratamiento térmico

Existe una amplia variedad de hornos para realizar tratamientos térmicos, los cuales varían en tamaño, fuente térmica, temperaturas de operación, modo de calentamiento, medio de transferencia de calor, modo de operación, entre otras, y por esta razón, no existe una única clasificación.

Si se considera el tamaño, existen hornos pequeños con capacidad de unos pocos gramos, y hornos grandes capaces de manejar cargas de toneladas en un solo ciclo de funcionamiento. Independientemente del tamaño, existen hornos que se pueden calentar de forma directa, donde la pieza se expone a los gases de combustión, o indirectamente, condición que se da cuando la pieza queda aislada de los gases. Además de estos dos métodos, existen los hornos calentados por resistencias eléctricas.

3.3.1 Modo de operación

De acuerdo con el *ASM Handbook Volume 4 – Heat Treating* [CITATION ASM91 \l 5130], los hornos utilizados comúnmente en procesos de tratamientos térmicos, dentro de los cuales se ubica el alivio de tensiones, se clasifican en dos amplias categorías de acuerdo con su modo de operación; hornos de bache y hornos continuos.

Hornos tipo bache

Un horno tipo bache se refiere a uno que se carga y se cierra para cumplir con un ciclo de calentamiento preestablecido. Luego de completado el ciclo de calentamiento, la carga puede enfriarse en el horno a una velocidad determinada, o sacarla del mismo para enfriarla por aire o en un medio de temple

Los hornos de bache estándar se utilizan comúnmente en ocasiones donde se requiere una amplia variedad de ciclos de temperaturas (calentamiento-mantenimiento-enfriamiento). Otros tipos usuales que se ubican dentro de la clasificación del tipo bache son los hornos de baños de sales y los de camas fluidizadas. El uso de equipo de bache para tratamientos térmicos usualmente requiere una labor considerable para cargar, manejar y descargar las piezas que se desean trabajar.

Estos hornos se emplean normalmente para tratar térmicamente bajos volúmenes de partes (en términos de peso por hora), lo que corresponde a los siguientes tipos de proceso:

- Partes especiales para las cuales sería difícil adaptar un sistema conveniente para el manejo continuo.
- Piezas grandes en pequeñas cantidades, por ejemplo, alivio de esfuerzos, recocido de partes soldadas o piezas de fundición.
- Partes que demandan un amplio ámbito de ciclos de calentamiento y enfriamiento que necesiten variarse fácilmente.

El procesamiento mediante este tipo de hornos, es especialmente apropiado cuando las cargas deben ser calentadas desde una temperatura ambiente a una temperatura máxima a una tasa controlada, luego mantenerse a esa temperatura y por último enfriarse a un ritmo controlado. Dentro de esta categoría, de la cual se desprenden una considerable cantidad de hornos de distintas características, tamaño y propósitos; se ubica el horno que actualmente se está rediseñando, esto debido a su geometría y particularidades, como lo describe a continuación el *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*.

Hornos de carro

Conocido en inglés como “*bogie hearth furnace*”, este es un horno tipo bache extremadamente grande. La parte inferior del mismo está construido de manera que un carro pueda desplazarse dentro y fuera del horno para cargar y descargar las piezas a tratar.

Los carros que se utilizan en el horno (que se refiere más a una bandeja montada sobre ruedas, diseñada especialmente para montar las piezas a tratar), pueden ser auto propulsados con el motor de accionamiento ubicado en el mismo carro, o pueden ser movidos dentro y fuera del horno mediante un sistema ubicado en el suelo con cadena y poleas, o con ayuda de sistemas engranados que permitan transmitir la potencia al carro. Los sistemas de calentamiento son usualmente con fuego directo, o mediante resistencias eléctricas.

La mayor parte de los hornos de carro son calentados desde temperatura ambiente con la carga ya dentro del horno. Un ciclo típico consistiría en calentar desde una temperatura ambiente hasta una controlada a un ritmo determinado, mantener esa temperatura por un periodo de tiempo específico, y posteriormente enfriar lentamente a una tasa específica.

El uso de fibra cerámica como aislante térmico en un horno de carro permite un mayor control de la temperatura del horno bajo un ciclo programado. Debido a que la fibra cerámica tiene una capacidad mínima de almacenar calor, comparado con otros materiales refractarios, este calienta y enfría a mayores velocidades. Además, menos calor total es requerido para llevar el horno a la temperatura deseada, aunque la diferencia sea mínima dado que el total del calor está determinado mayoritariamente por la masa que se está tratando térmicamente.

Los hornos de carro son utilizados para alivios de tensiones que van desde los 540°C (1000°F) hasta temperaturas por encima de los 1095°C (2000°F) para determinadas aplicaciones. Este tipo de horno se calienta por radiación, cualquiera sea el tipo de energía usada para el calentamiento.

Hornos continuos

Los hornos continuos tienen los mismos componentes que los de bache, no obstante, estos operan en ciclos ininterrumpidos mientras las piezas se mueven a través de ellos. Como consecuencia de esto, los hornos continuos son en su mayoría adaptables a la automatización y son, por lo general

(aunque no siempre), utilizados para manejar grandes volúmenes de trabajo. Por ejemplo, los hornos continuos para la carburización son generalmente escogidos para cargas de producción que exceden los 180kg/h, o para cargas de suficiente tamaño que requieren una operación continua de 24 horas. Algunos tipos de hornos están equipados para proveer enfriamiento bajo atmósferas protectoras.

Existen muchos diseños de hornos continuos, pero básicamente todos presentan un "extremo de entrada" y un "extremo de salida". Estos hornos están pensados para una producción continua de partes similares. En general se los diseña para manejar una amplia variedad de ciclos térmicos.

Una ventaja de este tipo de horno, es la precisión con que se llevan a cabo los ciclos de tiempo-temperatura, los cuales son función de la tasa de movimiento a través de las distintas zonas del horno. En cuanto al control de la atmósfera, la constante apertura y cierre de las puertas del horno pueden afectar la atmósfera interna del mismo durante los ciclos de carga y descarga.

Existen distintos tipos de hornos continuos, los tipo correa utilizan una correa para transportar las piezas. El tipo de correa utilizada depende del tamaño y peso de las piezas, y de las temperaturas de operación. Los hornos continuos de empuje están diseñados para manejar cargas unitarias mayores que los de tipo correa. Un brazo mecánico que opera en el extremo de entrada empuja la carga periódicamente dentro del hogar. La carga se coloca en una bandeja o cesto que rueda sobre rieles o rodillos. Los hornos continuos de hogar rotatorio constituyen una excepción a los hornos rectos. En este tipo de horno, el hogar es un anillo plano, similar al piso de un carrusel.

3.3.2 Forma de transferencia de calor

Los tres modos básicos de transmisión de calor, como se mencionaron anteriormente son conducción, convección y radiación y pueden utilizarse ya sea solo o combinado entre ellos. En esta pequeña sección se da un breve enfoque de estos tres tipos de transmisión de calor en el horno específicamente.

Conducción

En la mayoría de los tratamientos térmicos, la conducción tiene un papel menor en el total de calor transferido desde la fuente a la pieza; sin embargo, es el único modo de transferencia desde la superficie de ésta al centro. Una excepción a este rol minoritario ocurre en el baño de sal con electrodo inmerso y en el lecho fluidizado. Mientras que los tres modos están presentes en estos casos, la conducción juega un papel importante debido a que el medio caliente está en contacto directo con la superficie del metal.

Convección

La convección involucra la transferencia de calor por mezcla de una parte del fluido (líquido o gas) con otra. El movimiento del fluido puede deberse enteramente a la diferencia de densidad producto de la diferencia de temperatura, como en la convección natural, o puede producirse por medios mecánicos, como en la convección forzada. Por lo general, se utilizan ventiladores para incrementar el coeficiente de transferencia térmica del sistema.

Radiación

En términos prácticos, cuando se coloca una pieza de trabajo en un horno y se la expone a calor por radiación, su velocidad de calentamiento depende de su superficie. Un objeto altamente reflectante (e.g. acero inoxidable pulido) absorbe calor a menor rapidez que un objeto oscuro. La mayor parte de los hornos de tratamientos térmicos que operan a temperaturas superiores a 600°C son calentados principalmente por radiación, independientemente de su tamaño, o de si son calentados por elementos de resistencia eléctrica, directamente por medio de la radiación de quemadores y las paredes del horno, o indirectamente por quemadores contenidos en tubos (tubos radiantes). Un horno típico de tratamiento térmico calentado por radiación, es el horno bache del tipo caja simple. Los elementos de calentamiento, que en este caso corresponden a resistencias eléctricas, se encuentran en las paredes laterales. En muchos hornos de gran tamaño se emplea adicionalmente la convección forzada por medio de ventiladores para aumentar la eficiencia de calentamiento y la uniformidad de temperatura.



Ilustración 3.12 Horno tipo bache

Fuente: Dra. Stella Ordoñez, Técnicas Experimentales de Metalurgia

3.3.3 Medio de transferencia empleado.

Otra manera de clasificar los hornos para tratamientos térmicos es por el tipo de medio de transferencia empleado; esta clasificación es válida independientemente del tamaño y la mayoría de

las variables comunes de los componentes del horno. Hasta hace poco, sólo se usaban dos medios de transferencia calórica: gaseoso y líquido (metal fundido o baño de sales fundidas). Recientemente se han incorporado a las opciones los hornos de lecho fluidizado han probado ser una herramienta útil para tratamiento térmico, añadiendo un nuevo medio: sólido.

Atmósferas gaseosas

En ocasiones, pueden presentarse operaciones de tratamiento térmico en las cuales se debe proveer alguna forma de protección superficial a las piezas de trabajo para evitar su oxidación y/o descarburización (en el caso de aceros). Por ejemplo, en aceros al carbono ocurre una oxidación severa sobre los 400 °C. En general, las atmósferas de los hornos son necesarias cuando se requiere proteger las piezas tratadas, cuyas superficies están limpias y esencialmente sin modificación respecto de su condición previa (calentamiento neutral), o lograr una condición controlada de cambio superficial (e.g. en operaciones de endurecimiento superficial). Cuando las piezas se calientan en baños de sales fundidas o lecho fluidizado, automáticamente quedan protegidas debido a que se encuentran inmersas. También es posible lograr cambios superficiales controlados en estos casos.

Los tipos principales de atmósferas gaseosas (en orden incremental de costo) que normalmente se utilizan son:

- Natural (aire atmosférico).
- Gases de combustión.
- Exotérmica, el gas se produce en un generador y luego se introduce en el horno. Alcanza temperaturas de hasta 900°C.
- Endotérmica, se prepara el gas en un generador dentro del horno y se utilizan aire y un hidrocarburo como combustible.
- Base nitrógeno.
- Vacío.
- Amoníaco disociado.
- Hidrógeno seco (en tubos).
- Argón (en tubos).

Hornos de baño líquido

Inicialmente, este método consistía en sumergir la pieza a tratar en un metal líquido (usualmente plomo), no obstante, esta práctica, utilizada fundamentalmente con aceros, ha sido desplazada por el

uso de sales fundidas debido a que el plomo es muy denso, lo que ocasiona que las piezas tiendan a flotar; adicional a esto, el plomo se adhiere a la superficie del acero dificultando algunos tratamientos (como el temple) e imponiendo problemas de limpieza.

Los baños de sales fundidas se utilizan como un medio eficiente para calentar metales, principalmente aceros, aunque algunas composiciones son compatibles con metales y aleaciones no ferrosas. Las sales fundidas ofrecen varias ventajas: (1) los distintos tipos de sales ofrecen en conjunto un rango de operación de 175°C a 1260°C; (2) la superficie de las piezas queda totalmente protegida; (3) para el caso del temple, este se ve facilitado gracias a que una delgada película de sal permanece en la superficie durante la transferencia desde el horno al medio de temple.

Existe una amplia variedad de sales, incluyendo las que pueden cambiar la condición superficial del acero. La desventaja principal de calentar piezas en sales fundidas es la necesidad de limpiarlas después del tratamiento, lo cual puede ser difícil, especialmente en piezas de geometría compleja. Existe una variedad de sistemas de calentamiento que se utilizan para los baños de sales. El más simple, aplicable a temperaturas de 175 a 350°C, involucra a un recipiente metálico con calefactores eléctricos de inmersión, lleno de una sal de bajo punto de fusión. Para mayores temperaturas se requieren equipos más sofisticados.

Hornos de cama fluidizada

El enfoque más reciente para calentar metales es la utilización de un lecho fluidizado. Este calentamiento se lleva a cabo en un lecho de partículas inertes, usualmente óxido de aluminio. Las partículas se encuentran suspendidas por un proceso de combustión que fluye hacia arriba a través del lecho. Los componentes se encuentran inmersos en este lecho de este fluido caliente. Por la alta relación de área de contacto a volumen de aire caliente las velocidades de transferencia calórica en un lecho fluidizado son hasta diez veces superiores a las alcanzadas en hornos convencionales de calentamiento directo. También son mayores que las obtenidas en baños de sales dado que el medio es gaseoso y su menor viscosidad y densidad facilita su movimiento.

La combinación de una alta razón de transferencia de calor, mayor capacidad de almacenamiento térmico, y uniformidad de comportamiento en un amplio ámbito de temperaturas provee un baño de temperatura constante muy versátil para muchas aplicaciones. Adicionalmente, las partículas del lecho no se adhieren a las piezas, de modo que no hay problemas de limpieza, ni hay arrastre de partículas fuera del lecho, en comparación al arrastre constante de sal desde un baño de sales, lo cual puede traducirse en un factor de costo favorable al uso del lecho en tratamientos térmicos.

Los lechos fluidizados pueden adaptarse a todo tipo de tratamientos, tanto en materiales ferrosos como no ferrosos. Aunque el tratamiento térmico en lecho fluidizado fue patentado en 1950, su uso se veía restringido por el hecho de que sólo se podía calentar los lechos por medios eléctricos, haciendo difícil e ineficiente el calentamiento sobre 700 °C. Con la introducción de lechos calentados por combustible, que utilizan una mezcla gas/aire como medio de calentamiento y fluidización a la vez, se dispone ahora de hornos que realizan todos los tratamientos estándares.

Hornos al vacío

A diferencia de los demás tipos de hornos que pueden adaptarse a una o más atmósferas de trabajo, los hornos que funcionan al vacío deben ser diseñados específicamente para ese propósito, independientemente del hecho que puedan también usar otras atmósferas, como argón, nitrógeno o hidrógeno. En estos casos no es necesario ni práctico garantizar un vacío total, por lo que típicamente el vacío efectivo es de aproximadamente 1 hPa (1 mbar) en unidades absolutas.

Bajo estas condiciones, la cantidad del aire original remanente es de aproximadamente un 0,1%. Este vacío se puede alcanzar mediante bombeo con una bomba mecánica. Cuando se requieren vacíos superiores a ese (menos del 0,1%), al bombeo mecánico lo sigue el uso de la altamente sofisticada bomba de difusión. Para evitar la pérdida de resistencia de las paredes debido a las elevadas temperaturas (lo que haría al horno susceptible de sufrir una implosión bajo vacío), éstas son refrigeradas por agua.

Los hornos al vacío ofrecen un número de ventajas como que se evita la descarburización, una alta uniformidad a altas temperatura (baja distorsión) y prácticamente no hay riesgo de oxidación de la pieza. Sus principales desventajas son el alto costo inicial del equipo y que la operación debe seguir rigurosos protocolos.

3.4 Componentes principales de un horno

Dependiendo de la aplicación del horno, algunas de sus partes pueden variar, pero hay ciertos elementos comunes.

El componente principal es la zona de trabajo, en la cual se lleva a cabo el proceso requerido. Usualmente esta zona se separa del exterior por medio de la bóveda, las paredes y la solera; todas construidas de materiales refractarios y termoaislantes. En su base se encuentran los cimientos, construidos de materiales comunes.

En los casos donde el calentamiento del horno se da por la ignición de un combustible, se tiene un espacio para alojar los sólidos, mecheros o quemadores para el combustible. En ocasiones estos espacios no se tienen y la ignición de combustibles se lleva a cabo directamente en la zona de trabajo y la eliminación de los productos de combustión hacia la atmósfera se hace por medio de la chimenea, a través de canales diseñados específicamente para tal fin.

Cimientos

Los cimientos son la parte del horno que se apoya directamente en el suelo y que sostiene las demás partes del mismo. Lo único que se requiere de los cimientos es una absoluta solidez para aguantar toda la carga estática de las partes dispuestas encima, así como las eventuales cargas dinámicas, sin sufrir deterioro alguno. Deben tener dimensiones suficientes para que la presión contra el suelo no supere los valores admisibles.

Plataforma

Es el plano superior a los cimientos del horno y el inferior a la mampostería. En su construcción se emplean distintos materiales como ladrillos refractarios y termoaislantes. El tipo de construcción y espesor de la plataforma dependen de la estructura del horno. Su fin principal es proveer una superficie sobre la cual pueden ser dispuestas todas las partes inferiores del horno.

Solera u hogar

Parte del horno sobre la cual se coloca el material fundido o los materiales o piezas a calentar. Puede formar un solo conjunto con las paredes y techo, pero también existen hornos con soleras móviles, como lo es el caso del horno tratado, donde esta puede moverse dentro y fuera de él para facilitar el transporte de la carga. Para ambos tipos de solera estas deben ser capaces de soportar las cargas máximas que pueden ser tratadas en el horno, y en el caso de las móviles, es importante un buen sistema de rodamientos que no dificulte su movimiento y debe ser diseñada para conseguir hermetismo en la zona de contacto de la solera con las paredes.

Paredes

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno, por lo general ellas mantienen la bóveda. Deben proteger la zona de las pérdidas de calor, no permitir el escape de los gases de hogar ni succión de aire de la atmósfera hacia el interior del horno. La cara más importante de las paredes es la interior. Debe esta ser pareja, limpia y tener juntas delgadas. Se fabrican con ladrillos enteros y sanos tanto de sus caras, como de aristas y ángulos.

Bóveda

La bóveda es una de las partes más importantes del horno. Por lo general soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Al encontrarse los gases calientes en la parte superior de la zona de trabajo y a presiones superiores a las normales, la bóveda debe ser impermeable para con los mismos, y debe ser capaz de soportar los choques térmicos a los que se verá sometida por las variaciones de temperatura y en ocasiones también hay riesgo de rotura por impacto.

Hay bóvedas planas (de ladrillos), de arco, semicirculares y suspendidas.

Juntas térmicas

Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor; no deben rebajar la solidez de la misma ni ser causa de escape de gases, metales o escorias. El ancho y disposición de las juntas se determinan de acuerdo con el calentamiento de una parte determinada del horno y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

Esqueleto metálico

Se le conoce como esqueleto metálico a la estructura que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo. El esqueleto transmite la carga a los cimientos y sus partes se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno como marcos, tapas, puertas, ventanas y otros.

3.5 Hornos eléctricos

La idea de la construcción de hornos eléctricos comenzó aproximadamente a mitad del siglo XVIII, pero no fue hasta después de 1900 que se inició su utilización a escala industrial. Después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la energía eléctrica comenzó a bajar de precio, se volvió competitiva respecto a los de los combustibles.

El calentamiento eléctrico se utiliza cuando el proceso tiene demandas especiales como altas temperaturas, ausencia de contaminantes o un control sumamente preciso de la temperatura.

Las ventajas y desventajas de los hornos calentados eléctricamente se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.3 Ventajas y desventajas de hornos calentados eléctricamente.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">● Los sistemas son limpios y libres de polución, a diferencia de los hornos que funcionan por fuego directo.● Alta eficiencia. El coeficiente de conversión de electricidad en calor es prácticamente 100%, caso contrario cuando se utilizan combustibles comunes, donde parte de la energía es consumida en el calentamiento del aire y de los gases calientes que son expulsados a la atmósfera.● Se logran patrones más uniformes de calentamiento dentro de todo el horno.● Generalmente no necesitan limpiarse o purificarse.● La electricidad está disponible prácticamente en todo lado.● Posibilidad de mantener los hornos sin vigilancia fuera de las horas de trabajo por eliminación de peligro de explosiones.● Control de temperatura más exacto	<ul style="list-style-type: none">● Lo poco flexible del sistema hace que cambiar la capacidad de calentamiento de un solo elemento en una misma zona, resulta complicado.● Los costos iniciales del equipo son elevados.● Costos altos de operación.● Los tiempos de enfriamiento son más largos porque no hay aire de combustión disponible.● Los elementos no metálicos de calentamiento tienden a volverse frágiles conforme pasan los años y están sujetos a quebrarse cuando se manipulan o simplemente por vibración.

Fuente: Los autores, 2013.

3.5.1 Hornos de resistencia eléctrica

Se definen como hornos de resistencia aquellos que utilizan el calor disipado por efecto Joule en una resistencia óhmica, la cual puede estar conformada por la carga misma a ser calentada (hornos de calentamiento directo) o por resistencias adecuadas independientes de la carga (hornos de calentamiento indirecto), por las cuales circula corriente eléctrica.

En hornos de calentamiento directo, el material se coloca entre dos electrodos (en contacto directo con ellos), brindando una resistencia al paso de la corriente, y calentándose. Entre otras, estos hornos encuentran aplicación en los procesos de fabricación de electrodos de grafito, tratamiento térmico de metales y en hornos para la cementación de aceros.

Por otra parte, los hornos de calentamiento indirecto utilizan las formas de radiación, convección y/o conducción mediante resistencias eléctricas para calentar el elemento. Las resistencias y la carga

por calentar se encuentran dentro de una cámara aislada térmicamente por medio de materiales refractarios y aislantes.

Los hornos calentados mediante resistencias eléctricas son comúnmente encontrados en todos los ámbitos de temperatura; desde bajas temperaturas para templado de materiales 150-200°C, [CITATION ASM07 \l 1046] pasando por el ámbito de tratamiento térmico y hasta temperaturas de forja (550 a 1250°C dependiendo del material[CITATION GRU13 \l 1046]).

Una disposición frecuente para las resistencias en el *arrollado en espiral sobre tubos cerámicos*. Permiten una radiación térmica bastante libre de las resistencias lo que, para la misma carga específica, supone un menor gradiente de temperatura entre resistencias y horno. Este tipo de resistencias pueden disponerse en bóveda, paredes laterales o solera, entre otros, siendo fácil su adaptación a diferentes potencias y zonas de regulación.

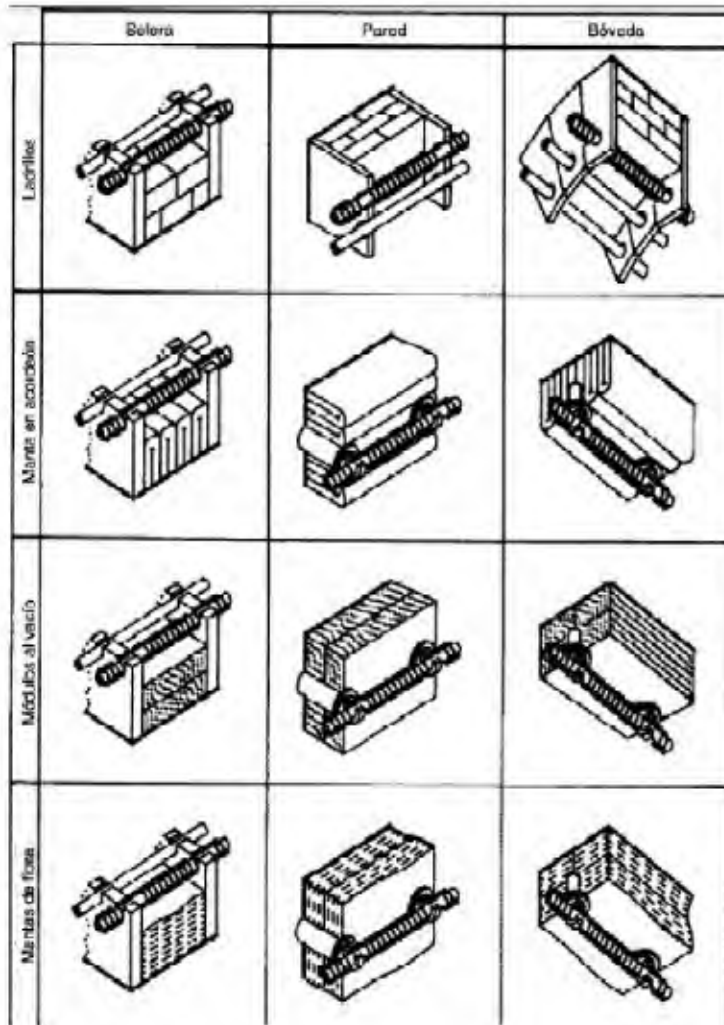


Ilustración 3.13 Disposiciones de espirales sobre tubos

Fuente: Universidad de Oviedo.

Otra configuración común son los *arrollados en espiral en ranuras cerámicas*. Es una disposición muy antigua y económica, pero la resistencia no irradia libremente, por lo que debe calcularse para una menor carga específica.

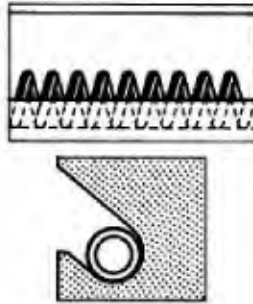


Ilustración 3.14 Alambre en espiral sobre ranuras.

Fuente: Universidad de Oviedo

Se muestran a continuación disposiciones de espirales de alambre en bóveda, pared vertical y solera, sobre módulos de fibra cerámica al vacío y sobre ladrillos o piezas cerámicas densas.

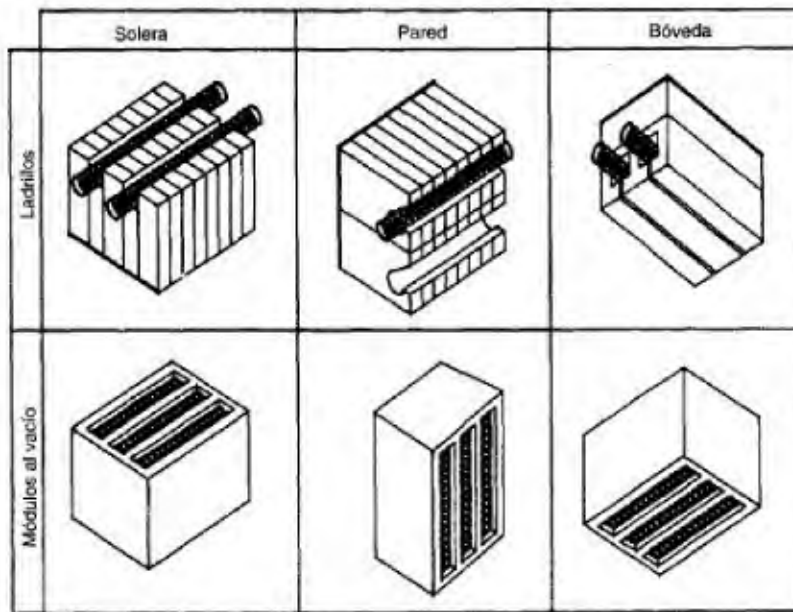


Ilustración 3.15 Disposiciones de espirales sobre ranuras.

Fuente: Universidad de Oviedo

Otra configuración es ondulada *con soportes de gancho*. En alambres o varillas gruesos esta disposición es muy conveniente para conseguir elevada potencia específica en kW/m^2 . Se emplean varillas de 5 a 8 mm de diámetro, soportadas por ganchos metálicos de acero refractario o cerámicos de silimanita. La temperatura máxima es de 1050°C para Ni-Cr y 1250°C para Fe-Cr-Al. En la siguiente ilustración se representan las disposiciones de alambre o varilla ondulados y soportados con ganchos en bóveda, paredes laterales y suelo.

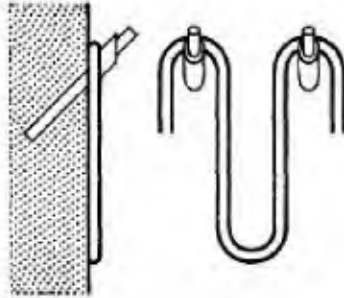


Ilustración 3.16 Ondulado sobre ganchos.

Fuente: Universidad de Oviedo

	Solera	Pared	Bóveda
Ladrillos			
Manta de acortación			
Módulos al vacío			
Mantas de fibra			

Ilustración 3.17 Disposiciones de varilla ondulada.

Fuente: Universidad de Oviedo.

También existe una *disposición de resistencias de pletina* que se consiguen en disposiciones de resistencias de gran robustez mecánica y gran potencia específica en kW/m², por lo que suelen adoptarse, frecuentemente, para hornos de más de 100-200 kW. Las más frecuentes son onduladas con soporte de gancho, que corresponden a pletinas desde 15 x 1 mm a 40 x 3 mm de sección. Permite temperaturas máximas de 1150°C para aleación Ni-Cr y 1300°C para Fe-Cr-Al. La máxima altura de las resistencias es 350 mm y el paso no debe de ser menor al doble de su ancho.

Se alcanzan potencias específicas en pared de 60 kW/m² para 1000°C de temperatura del horno, y la carga específica de las resistencias puede llegar, para la misma temperatura, a 5 W/cm².

Las resistencias pueden ir en bóveda, paredes laterales o suela realizándose el aislamiento mediante mantas de fibra cerámica en capas, módulos o placas de fibra cerámica al vacío, mantas de fibra cerámica plegada en acordeón, o ladrillos refractarios (los hay densos o aislantes). Son casi idénticas a las de alambre ondulado.

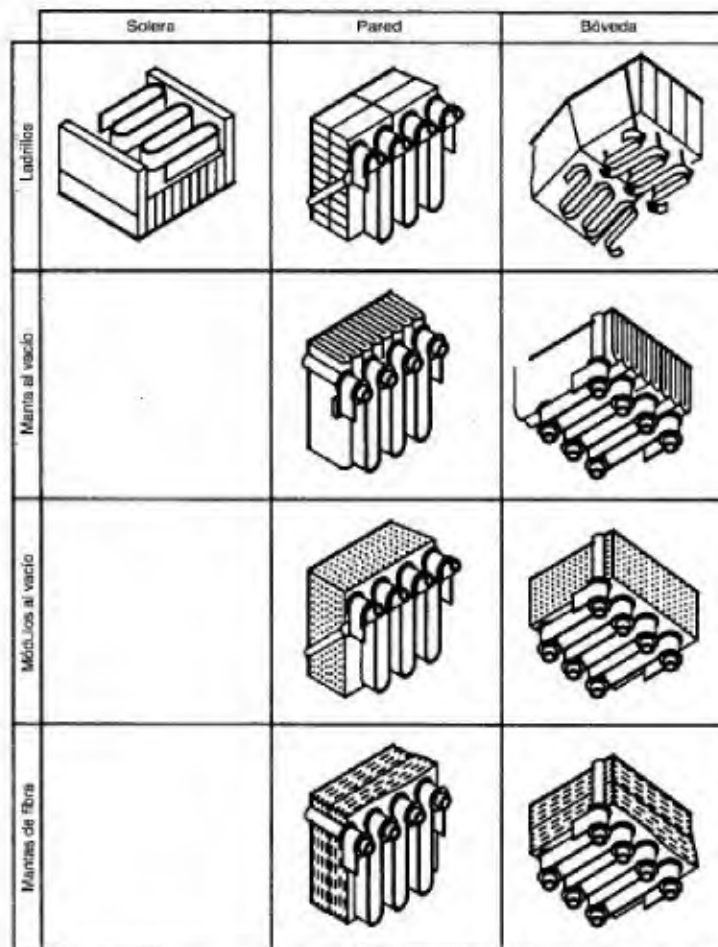


Ilustración 3.18 Disposición de pletinas onduladas

Fuente: Universidad de Oviedo

3.5.2 Elementos de calentamiento de resistencia metálicos

La mayoría de las atmósferas de los hornos que funcionan con gases diferentes al aire, afectarán de alguna manera el desempeño y posterior vida útil de cada tipo de material de calentamiento. Los fabricantes de estos materiales proporcionan tablas que les permiten a los diseñadores predecir el desempeño del material bajo distintas atmósferas de operación. Cada elemento de calentamiento puede estar expuesto a las distintas atmósferas con diversos grados de éxito.

Se utilizan dos tipos de aleaciones para estas resistencias; las austeníticas y las ferríticas. Las aleaciones austeníticas, son de Níquel-Cromo-Hierro (Ni-Cr-Fe) para temperaturas de hasta 850°C, dependiendo de los contenidos de estos elementos, o bien 80Ni-20Cr para temperaturas de 850°C a 1100°C. En cambio las ferríticas, consisten en aleaciones Cromo-Hierro-Aluminio (Cr-Fe-Al), conocidas como Supercalor, Kanthal, entre otros, y se utilizan para temperaturas de 1100°C a 1300°C.

Las resistencias metálicas, se utilizan en forma de hilos con diámetros variables de fracción de milímetros a aproximadamente 6 mm, por lo general enrolladas en forma helicoidal, o en forma de cintas dispuestas en zig-zag, como puede observarse en la ilustración 3.8

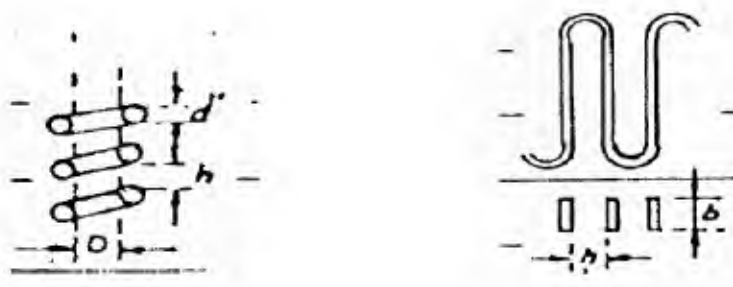


Ilustración 3.19 Formas de resistencias metálicas. Helicoidal (izquierda) y Zig-Zag (derecha).

Fuente: Ordoñez, s.f

3.5.3 Elementos de calentamiento de resistencia no metálicos

En general, los elementos de calentamiento no metálicos se utilizan en hornos que operan por encima de los 1010°C (1850°F). Los elementos de carburo de silicio se usan para temperaturas de hasta 1500°C, tienden a ser muy frágiles, por lo que deben manipularse con cuidado y también debe tenerse esto en cuenta en el diseño; deben estar bien sujetos y a la vez permitir su expansión y contracción cuando el horno se calienta y enfría respectivamente. Estos elementos experimentan un aumento en su resistencia con el paso de los años, por tanto, para mantener una potencia fija a través de su vida útil, es necesario contar con un método para ajustar el voltaje, usualmente con un

transformador elevador. La vida útil de un elemento hecho con carburo de silicio se establece usualmente en el punto cuando su resistencia ha aumentado en un factor de cuatro.

Existen también resistencias de silicato de molibdeno para temperaturas de hasta 1700°C y de grafito y molibdeno (en pastillas, cilindros o granulados en tubos) para temperaturas de hasta 1800°C.

Las resistencias no metálicas, están constituidas por astas (o tubos) fijados horizontalmente entre dos paredes del horno, o verticalmente entre el suelo y la cubierta.

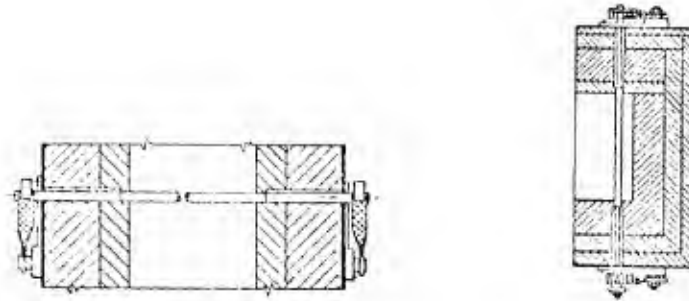


Ilustración 3.20 Posición de resistencias no metálicas en los hornos. Montaje horizontal (izquierda), montaje vertical (derecha).

Fuente: Ordoñez, s.f

Los hornos calentados eléctricamente, pueden operar en un amplio ámbito de temperaturas; desde hornos de baja temperatura que se utilizan para el proceso de templado (750°C hasta los 1300 °C), para normalizado y recocido (600°C), hasta llegar a temperaturas de forjado (menos de 1300 °C). La consideración básica al momento de seleccionar el tipo de elemento de calentamiento consiste en determinar si estos elementos serán del tipo directo (o abierto), que están expuestos a la atmósfera interna del horno, o del tipo indirecto, que están protegidos del ambiente del horno mediante medios como tubos radiantes. Los factores que afectan esta decisión son la atmósfera del horno, la necesidad de proteger los elementos de daño mecánico y el espacio necesario para colocar el elemento.

3.6 Materiales refractarios

3.6.1 Composición y aplicaciones

Los materiales refractarios tienen la propiedad de poder soportar altísimas temperaturas, superiores a los 1400°C, sin sufrir cambios en su composición química ni daño mecánico. Constituyen un conjunto de productos intermedios indispensables en un país desarrollado, ya que sin ellos, toda la producción industrial que se da en condiciones de operación extrema o severa, como ataque químico o tensiones mecánicas, se vería interrumpida. Procesos como la fusión, depurado o

calcinado, entre otros, serían muy difíciles de llevar a cabo si los hornos o equipos de producción, no estuvieran protegidos por materiales refractarios.

Existen procesos de producción que no pueden ser puestos en marcha sin que antes no se haya desarrollado el revestimiento refractario adecuado. Se comprende entonces, que los materiales refractarios juegan un papel indispensable en muchos procesos de variada índole.

Un revestimiento refractario-aislante, logra que las pérdidas de calor a través de las paredes del horno sean bajas, logrando un ahorro energético al requerirse menos calor.

La industria de los materiales refractarios ha presentado una extraordinaria evolución en los últimos años, como consecuencia de las exigencias en las especificaciones de las industrias consumidoras. Esto se traduce no solamente en un estricto control de materias primas y en una mejora de los procesos de fabricación, sino también en un aporte científico de técnicas que han permitido el establecimiento de los diagramas de equilibrio de fases de los óxidos potencialmente utilizables como refractarios por su elevado punto de fusión (Al_2O_3 , CaO , SiC_2 , MgO , ZrO_2 , etcétera), lo que ha supuesto un mejor conocimiento de la influencia de las impurezas presentes, a la temperatura y condiciones reales de trabajo de cada tipo de material.

De acuerdo con su carácter químico, los refractarios tradicionalmente se dividen en: ácidos (ladrillos de arcilla cocida de bajo contenido de alúmina y alto en sílice), básicos (magnesita y dolomía) y neutros (cromita y carbono). Las paredes de los hornos típicamente la componen capas de dos materiales con funciones distintas: una capa debe de resistir las altas temperaturas interiores, y la otra debe reducir las pérdidas de energía.

Los refractarios (o ladrillo aislante refractario) instalados en la caras interiores de las paredes del horno, deben resistir mecánicamente las altas temperaturas. Vale la pena insistir en la definición de material refractario: es aquel que a altas temperaturas mantiene sus propiedades mecánicas. Esto supone, en primer lugar, que el material no contiene mucho vidrio en su microestructura, y por otra parte que los cristales están bien empaquetados, o sea, que poseen alta densidad.

A continuación se mencionan propiedades térmicas de materiales refractarios típicos de alta y baja densidad:

Cuadro 3.4 Propiedades típicas de materiales refractarios

Propiedad	Alta masa térmica (refractarios de alta densidad)	Baja masa térmica (fibra cerámica)
Conductividad térmica (W/m·K)	1,2	0,3
Calor específico (J/kg·K)	1000	1000
Densidad (kg/m ³)	2300	130

[CITATION Ene06 \l 1046].

Por otra parte, los materiales aislantes deben su baja conductividad térmica a los poros, mientras que su capacidad de almacenar calor depende de la densidad aparente (cantidad de material aislante en un volumen determinado) y el calor específico. El calor excesivo afecta a todos los materiales aislantes de manera adversa, sin embargo, la temperatura a la que esto sucede varía ampliamente.

Por esta razón, la elección de un material de este tipo debe ser basada en su habilidad para resistir el paso de calor y en el valor máximo de temperatura al que va a estar expuesto.

Cuadro 3.5 Propiedades físicas de materiales aislantes

Tipo	Conductividad térmica a 400°C	Temperatura máxima de operación (°C)	Porcentaje de porosidad	Densidad aparente (kg/m ³)
Diatomite – Grado sólido	0,0025	1000	52	1090
Diatomite – grado poroso	0,014	800	77	540
Arcilla	0,030	1500	68	560
High alumina	0,028	1500-1600	66	910
Sílice	0,040	1400	65	830

Fuente: [CITATION Enc06 \l 5130]

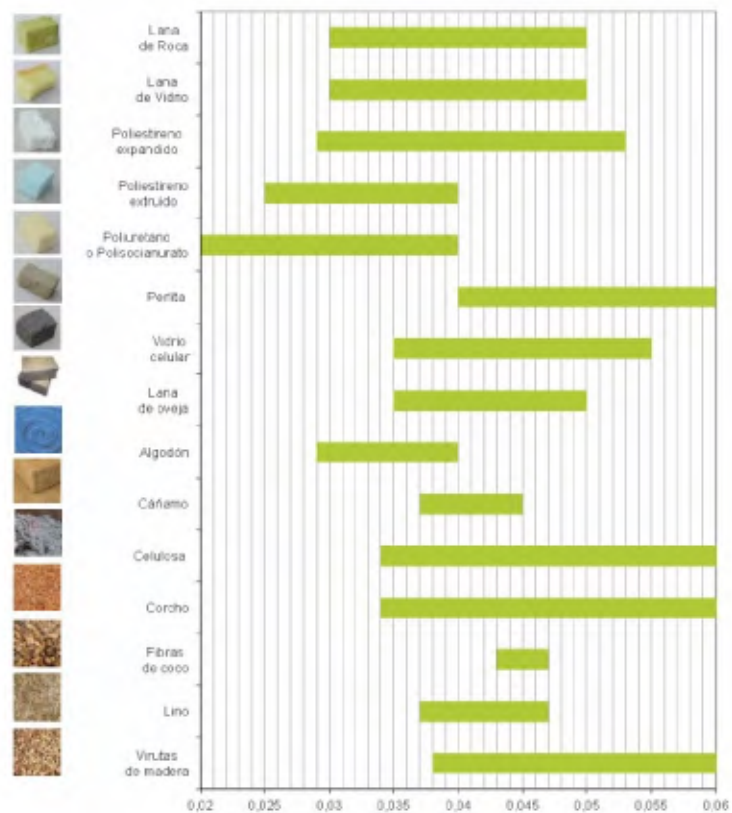


Ilustración 3.21 Conductividad térmica de materiales aislantes comunes

Fuente: [CITATION Ins \l 5130]

Si bien hay materiales que cumplen con ambas funciones, no es práctico ni se justifica el costo, por lo que normalmente las paredes de los hornos están compuestas por varias capas en las que se va graduando y equilibrando la función del refractario y el efecto del aislante de los materiales.

En la ilustración 3.11 se puede observar un perfil de temperaturas en la sección transversal de la pared de un horno. El mayor descenso en la temperatura no se da en el refractario sino en el material aislante.

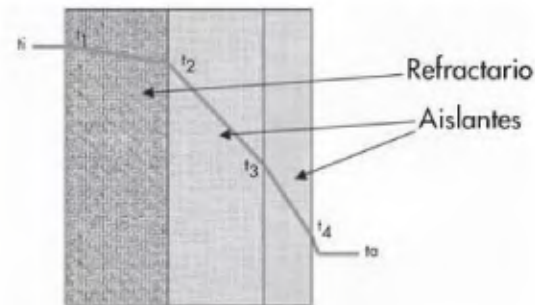


Ilustración 3.22 Perfil de temperatura en la sección transversal de la pared de un horno

Fuente: Catells, 2011.

Una vez en este punto se hace la pregunta sobre el diseño del espesor de cada una de las capas de material aislante. Por lo general el espesor resultante de las diferentes capas de aislante es algo superior a lo correspondiente al refractario debido a los siguientes aspectos:

- El espesor de la capa de material refractario obedece a razones de estabilidad mecánica, lo que exige un mínimo de espesor, pero no es un buen aislante térmico. En función de la calidad intrínseca del refractario y de la forma de la pared, este espesor puede variar pero la práctica muestra que lo hace en márgenes muy estrechos.
- A diferencia de lo que acontece con la parte correspondiente al refractario, los hornos suelen tener más de una capa de material aislante para reducir su costo inicial. Los productos aislantes para altas temperaturas son mucho más caros que los aislantes de baja temperatura, por tanto, usando diversas calidades se puede optimizar el aislamiento. El espesor total de la capa de aislante viene condicionado por el salto térmico total que se desea, es decir, por la temperatura de la cara fría cuando se ha establecido el régimen transitorio de transmisión de calor [CITATION Xav11 \l 5130].

Actualmente para reducir la razón a la cual el calor proveniente de las resistencias eléctricas sale al ambiente, el horno cuenta con un material aislante entre las paredes internas y externas, así como en el techo y la puerta. En cualquiera de estas superficies el uso de refractario es imprescindible por las temperaturas que se alcanzan.

3.7 Materiales estructurales resistentes a temperaturas altas

Una lista parcial de productos típicos puede ser dividida en dos categorías; la primera consiste en partes que pasan a través del horno y por consiguiente están sometidas a choques térmicos y/o mecánicos, esto incluye bandejas, accesorios, cadenas y correas de transporte (en caso de haberlas).

La segunda categoría comprende partes que permanecen dentro del horno y no están sujetas a choques térmicos tan altos como las primeras, esto incluye vigas de soporte, tubos de combustión, tubos radiantes, quemadores, ventiladores, rieles.

La gran mayoría de hornos para tratamientos térmicos utilizan aleaciones Fe-Cr-Ni suficiente a altas temperaturas (por encima de los 980°C en estos hornos) sin volverse susceptibles a la fragilización, que es lo que ocurre con las aleaciones Fe Cr a partir de los 475°C.

Todos los aceros comúnmente utilizados para la fundición de partes de hornos tienen esencialmente una estructura austenítica. Las aleaciones Fe-Cr-Ni (HF, HH, HI, HK, y HL) pueden contener algo de ferrita, dependiendo del balance en la composición. Si son expuestos a temperaturas en el rango de los 540°C a 900°C, estas composiciones pueden volverse frágiles. Esto se puede evitar utilizando aleaciones apropiadas de Ni, Cr, C y elementos menores asociados.

Las partes hechas de aleaciones, representan una porción considerable del costo total de una operación de tratamiento térmico. Estas deben ser seleccionadas cuidadosamente, diseñadas de manera apropiada y operadas con un control óptimo a todo momento con el fin de controlar los costos.

3.7.1. Bandejas y parrillas

Las bandejas o parrillas que transportan la carga dentro y fuera del horno deben ser capaces de soportar las mismas condiciones de temperatura a las que son sometidas las piezas a tratar térmicamente. Están sometidas a repetidos procesos de calentamiento y enfriamiento, así como también a continuos esfuerzos de tensión y compresión. Las aleaciones resistentes al calor se usan ampliamente para estas partes, aunque se presentan casos donde se utilizan aleaciones bajas en C o simplemente sin presencia alguna de C. En estos casos, la elección se basa en aspectos económicos.

Dos tercios de las aproximadamente quince composiciones de las aleaciones más comunes resistentes al calor encuentran aplicación en la industria de los tratamientos térmicos. De estas, la mitad son recomendadas para utilizarse en bandejas y parrillas. La aleación seleccionada debe escogerse basándose en el esfuerzo requerido a cierta temperatura, la ductilidad y la resistencia a la corrosión por oxidación.

Las bandejas y parrillas hechas de aceros inoxidable austeníticos que contienen aproximadamente 10% de Ni, puede encontrar aplicación en temperaturas de horno que rondan los 650°C hasta los 870°C, pero si las temperaturas son más elevadas, por ejemplo, de 1040°C a 1150°C, una aleación con el doble del Ni probablemente sería escogida.

La atmósfera particular que rodea las bandejas, requiere la consideración de cantidades variadas de adiciones de cromo para aumentar la resistencia a la oxidación o a la corrosión por altas temperaturas. Si las bandejas se van a utilizar en una atmósfera con altos porcentajes de azufre, una

aleación con más cromo y menos níquel sería seleccionada. Algunas aleaciones contienen relativamente grandes cantidades de silicio para fortalecerlas contra la carburación y cementación.

3.7.2. Rieles y rodamientos

Algunos componentes del horno están sujetos a condiciones de servicio adicionales que deben ser consideradas cuando se va a optar por un diseño particular o una selección de aleación. Este grupo de partes incluye los componentes para el transporte de la carga.

La selección apropiada de una aleación para un servicio específico a alta temperatura implica la consideración de muchos factores. De particular interés es evitar que haya elementos con la misma composición química para reducir cizallamiento o disminución de la superficie del rodamiento.

Por ejemplo, cuando se selecciona una aleación para hacer los rieles sobre los cuales se deslizan las bandejas, es necesario considerar varios factores. Hay que determinar si en el proceso va existir un enfriamiento forzado, cuál es el área de contacto de los rieles, cómo se sujetan los rieles y la carga a la que están sometidos. Así, puede inferirse que el diseño de los rieles y la selección de las aleaciones son una parte integral en el diseño del horno y los mismos principios aplican para los rodamientos.

Posiblemente el factor más importante que afecta a una rueda en una aplicación para tratamientos térmicos es el cojinete o el soporte de la misma. En algunas bandejas móviles, las ruedas operan dentro del área caliente del horno, y el eje debe rotar sobre un soporte sin lubricantes líquidos ni grasas.

3.8 Medición de la temperatura en el horno

La exactitud con que se midan y controlen las temperaturas dentro del horno, es el factor que determinará el éxito de la operación de algunos procesos metalúrgicos, como la fundición, la refinación y el tratamiento térmico. Asimismo, tendrá un profundo efecto sobre las propiedades de resistencia de muchos metales y aleaciones.

La temperatura de proceso debería controlarse dentro de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$. Aunque es técnicamente posible, es mucha más práctica que sea de unos $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Esto requiere tres etapas definidas, que son detectar la variable por controlar, registrar su valor y por último emitir una acción de control, lo que usualmente es una conexión o desconexión de fuentes de energía a través de contactores actuados eléctricamente.

3.8.1 Medición de temperatura por color

Uno de los métodos más sencillos para determinar la temperatura de un metal es mediante la observación del color del cuerpo caliente. Existe una correlación trivial entre la temperatura de un metal y su color, como se ve en la Tabla 1. Este método dará sólo estimaciones de temperatura aproximadas, excepto cuando lo aplique un observador experimentado. La principal dificultad es que la apreciación del color varíe con los diferentes materiales.

Cuadro 3.6 Variación del calor con la temperatura.

Color	Temperatura (°C)
Rojo tenue	620
Rojo oscuro	650
Cereza oscuro	700
Rojo cereza	800
Cereza subido	900
Naranja oscuro	900
Naranja	950
Amarillo	980

Fuente: Dra. Stella Ordoñez, Técnicas Experimentales de Metalurgia

En caso de requerirse una indicación o un registro continuo de la temperatura, los instrumentos que se utilicen pueden ser mecánicos que funcionan esencialmente por dilatación diferencial de un material sólido, un líquido, un gaseoso o eléctricos (resistencia, impedancia, voltaje diferencial como proporción a la temperatura o a la intensidad de la radiación térmica).

3.8.2 Termómetros por expansión metálica

La mayor parte de los metales sufren una expansión cuando se calientan, y la cantidad de expansión dependerá de la temperatura y del coeficiente de expansión de cada metal. Este principio se aplica en la cinta bimetalica que se utiliza en el termostato común. Dicha cinta se forma al unir sobre un costado de una tira de metal con coeficiente de expansión de alto, un metal cuyo coeficiente de expansión sea bajo. Como resultado de pequeños cambios de temperatura, la cinta tomara forma de curva y, por tanto, cerrará o abrirá un circuito eléctrico que controlará el sistema de calefacción de una casa.

Cuando la cinta bimetalica se emplea como indicador industrial de temperatura, generalmente esta enrollada en forma de espiral, uno de cuyos extremos se encuentran fijo, de manera de cuando hay expansión se obtiene automáticamente un movimiento rotatorio en el otro extremo.

La mayoría de las cintas bimetálicas utilizan *Invar* como uno de los elementos, debido a su bajo coeficiente de expansión, y latón amarillo como el otro para temperaturas bajas, o una aleación de níquel para temperaturas altas. Ambos se pueden usar en el intervalo de $-73,3^{\circ}\text{C}$ a 538°C , son muy resistentes y casi no necesitan mantenimiento. Su principal desventaja es, que al ser necesario encerrar el elemento de un tubo protector, la velocidad de respuesta puede ser menor que la de otros instrumentos.

3.8.3 Termómetro de expansión líquida

El resto del sistema mecánico de los instrumentos para medir la temperatura, ya sea por expansión líquida o por presión de gas o vapor, consta de un bulbo expuesto a la temperatura que se va a medir y un dispositivo expansible, generalmente un tubo Bourdon, que hace funcionar una aguja indicadora o una pluma registradora. El bulbo y el tubo Bourdon están conectados con un tubo capilar y se llaman con un elemento adecuado.

El termómetro por expansión líquida tiene el sistema entero lleno con un líquido orgánico adecuado o con mercurio. Los cambios de la temperatura del bulbo hacen que el líquido se expanda o contraiga, lo cual a su vez ocasiona que el tubo Bourdon también se expanda o contraiga. Los cambios de temperatura a lo largo del tubo capilar y en la caja también producirán alguna expansión y contracción del líquido; por tanto se requiere alguna forma de compensación.

Algunos de los líquidos empleados y las temperaturas a que se utilizan son:

- Mercurio, de $-37,2^{\circ}\text{C}$ a 510°C (-35°F a 950°F)
- Alcohol, de $-78,9^{\circ}\text{C}$ a $71,1^{\circ}\text{C}$ (-110°F a 160°F)
- Creosota, de $-6,7^{\circ}\text{C}$ a $204,44^{\circ}\text{C}$ (20°F a 400°F)

Los termómetros de expansión líquida son ampliamente utilizados, sin embargo, presentan varias desventajas como su dificultad para lectura, son de medición local, no son utilizados para control y se rompen fácilmente. [CITATION Cub14 \l 1046]

3.8.4 Termómetro por presión de gas o vapor

En el termómetro por presión de vapor, un líquido volátil llena parcialmente el bulbo. Diferentes temperaturas del bulbo producen variaciones de presión correspondientes en el vapor saturado arriba del nivel líquido en el bulbo. Estas variaciones de presión se transmiten al tubo Bourdon, y las indicaciones de presión actúan con una medida de la temperatura en el bulbo. Mediante una adecuada selección de líquido volátil, casi cualquier temperatura de -60°F a 500°F (51°C a 260°C) se puede medir. Algunos de los líquidos que más se utilizan son cloruro de metilo, éter alcohol etílico y tolueno.

El termómetro por presión de gas es semejante a lo de presión de vapor, excepto que el sistema se llena con un gas, generalmente nitrógeno. El intervalo de temperatura medido por el termómetro por presión de gas es de -200°F a 800°F (-130°C a 427°C).

Los termómetros con sistema lleno tienen principalmente aplicaciones a baja temperatura, como en los electrodeposición de metales y baños de limpieza, desengrasado, enfriamiento por agua y temperaturas de aceite, y las temperaturas bajo cero en el tratamiento en frío de metales. Estos instrumentos son relativamente baratos, pero no se emplean donde se requiere una reparación rápida o una exactitud excepcional.

3.8.5 Termómetro de resistencia

El principio del termómetro de resistencia se basa en el incremento de la resistencia eléctrica con el aumento de la temperatura de un conductor. Si se calibran las variaciones de temperatura-resistencia de un metal, es posible determinar la temperatura al medir su resistencia eléctrica. El resistor, con forma de bobina, está montado en el extremo cerrado de un tubo protector y las conexiones se hacen llegar hasta un instrumento adecuado de medición de resistencias.

Los resistores se hacen generalmente de cobre, níquel o platino. El níquel y el cobre son más apropiados para temperaturas de 65°C a 260°C (150°F a 500°F), en tanto que el platino puede emplearse entre -212°C a 594°C (-350°F a 1100°F). El termómetro de resistencia es muy exacto y de gran importancia en el laboratorio; sin embargo, su aplicación en la industria es limitada, porque es frágil y requiere de mucho cuidado en su manejo.

3.8.6 Pirómetro termoelectrico

Este es el método que más se emplea en trabajos de metalurgia para medir y controlar temperaturas; funcionan en forma satisfactoria hasta 1650°C (3000°F) aproximadamente.

El funcionamiento de este pirómetro se basa en dos principios:

- i. *Efecto Peltier*: Si dos alambres metálicos diferentes se ponen en contacto eléctrico, habrá una fuerza electromotriz a través de la punta de contacto. La magnitud de la fuerza electromotriz desarrollada se determina por la composición química de los alambres y la temperatura de la punta de unión.
- ii. *Efecto Thomson*: Si hay una diferencia de temperatura entre los extremos de un alambre homogéneo único, existirá una fuerza electromotriz (FEM) entre los extremos de dicho alambre. La magnitud de esta fuerza desarrollada quedará determinada por la composición, la uniformidad química del alambre y la diferencia de temperatura.

3.8.7 Termopar

Un par termoeléctrico o termopar es un circuito formado por dos hilos conductores metálicos distintos soldados entre sí por ambos extremos. Si cada soldadura está a una temperatura diferente, entre los extremos aparece una diferencia de potencial llamada fuerza electromotriz termoeléctrica (fenómeno conocido como efecto Seebeck). Esta fuerza electromotriz es la variable termométrica y se mide colocando un voltímetro entre los extremos de uno de los hilos. La relación entre la fuerza electromotriz (fem) y la temperatura es de la siguiente forma:

$$fem = a + bT = cT^2 + dT^3 \dots$$

Normalmente la forma cuadrática es suficiente [CITATION Esc \l 1046]. Las constantes a , b , c , ... se determinan a partir de un número suficiente de puntos fijos. Por ejemplo el par platino/platino-rodio se calibra mediante los puntos de solidificación del antimonio, la placa y el oro.

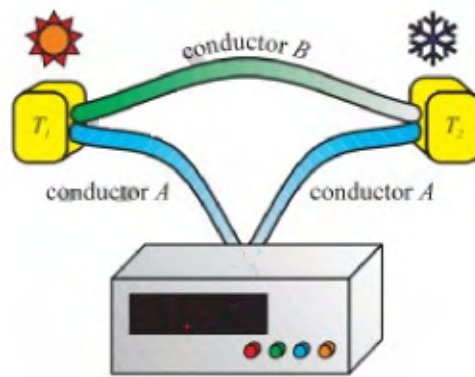


Ilustración 3.23 Medida de la temperatura mediante un termopar.

Fuente: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.

La medida de la temperatura mediante cualquier termómetro se basa precisamente en la determinación de la variación con la temperatura de las variables termométricas. Por ejemplo, en un termómetro de mercurio, al variar la temperatura varía el volumen que ocupa el mercurio. Así la longitud de la columna de mercurio encerrado en un capilar de sección constante proporciona una medida de la temperatura. Otras variables termométricas son la resistencia eléctrica de un metal (en termómetros de resistencia), la fuerza electromotriz (en termopares), etc.

Para el caso del horno del Taller Anonos, este ya posee termopares que fueron adquiridos recientemente, la ventaja del par termoeléctrico es que alcanza muy rápidamente el equilibrio térmico con el sistema cuya temperatura ha de medirse, ya que su masa es pequeña. Por ello, los termopares son particularmente adecuados para seguir los cambios de temperatura [CITATION Esc \l 1046].

Como se pudo ver en esta sección se presentaron conceptos comúnmente utilizados en el campo de hornos industriales para tratamientos térmicos con el fin de tener bases claras en este tema y así poder lograr clasificar el horno que será estudiado.

4 Caracterización del horno actual

En este capítulo se presenta el procedimiento de operación, los conceptos teóricos fundamentales de la condición actual del horno. Además, se presentan análisis y modelados matemáticos de la transferencia de calor en horno en su condición actual, así como un diagnóstico de los aspectos o puntos de mejora encontrados tanto en el proceso general como de la condición física del horno

4.1 Procedimiento de operación general

Como se mencionó en el capítulo 2, la labor de recargue por medio de los procesos de soldadura de las piezas es para restaurar el espesor requerido para los componentes mecánicos de máquinas hidráulicas con margen suficiente para lograr el acabado demandado por las condiciones de operación.



Ilustración 4.24 Apariencia física antes del recargue

Fuente: Taller Anonos CNFL, 2012.

Según evidencian las fotografías la ilustración 4.1, los elementos entran al taller con serios problemas de erosión y corrosión generalizada. Esto es provocado por factores como lo son los sedimentos dentro del sistema hidráulico o por cavitación.

Una vez llegado la pieza dañada al taller Anonos, se procede con la inspección de ésta y se ejecuta el proceso de mantenimiento correctivo. Para ello, el departamento de metrología se encarga de realizar y certificar todas las mediciones de la pieza para que el técnico en mecánica de precisión tenga los datos exactos del devastado inicial. Una vez mecanizada la pieza se traslada al departamento de soldadura donde se realiza el proceso de relleno, donde se producen los esfuerzos residuales tal y como es explicado en la sección 2.1. Es ahí donde se procede a realizar el proceso de alivio de tensiones posteriores a la soldadura para finalmente realizar el mecanizado final y acabado superficial de la pieza.

Luego del proceso de mantenimiento correctivo realizado en el taller, los elementos tratados vuelven a tener las propiedades mecánicas idóneas para poder mantener una eficiencia aceptable dentro del sistema hidráulico al que pertenecen. En la ilustración 4.2 se puede observar el acabado final de estos elementos.



Ilustración

4.25 Proceso antes y después del recargue

Fuente: Taller Anonos, Compañía Nacional de Fuerza y Luz

En ambas imágenes de la ilustración 4.2 se observa el antes y después de las piezas que se tratan en el Taller Anonos realizando el proceso de recargue en un álabe de turbina.

Como se explicó en la sección 2.1 las diferencias de temperatura locales en un componente pueden resultar en esfuerzos residuales localizados dadas las deformaciones asociadas a la dilatación térmica. En juntas soldadas, estos esfuerzos pueden quedar distribuidos como se muestra en la

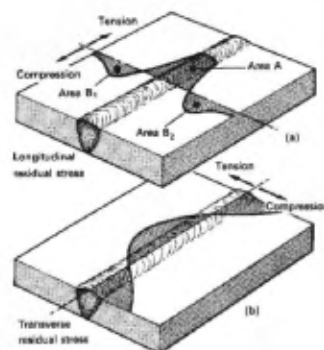


Ilustración 4.26 Distribución de esfuerzos residuales en juntas soldadas

Fuente: Ordoñez, s.f

Para aliviar estos esfuerzos, una vez que se completa la soldadura la pieza recibe un tratamiento térmico que inicia con abrir la compuerta del horno con un montacargas. Este procedimiento se realiza de esta manera porque no se cuenta con un sistema para abrir y cerrar la compuerta. Además, las barras rayadas que se pueden observar en la ilustración 4.4 se colocan manualmente para soportar la puerta en su posición totalmente abierta.



Ilustración 4.27 Apertura de puerta del horno.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Posteriormente se retira la bandeja del interior del horno por medio del montacargas que se engancha de la bandeja y tira de ella. Una vez que la bandeja se encuentra fuera del horno se procede a colocar, por medio de una grúa tipo puente, los elementos que recibirán tratamiento térmico.



Ilustración 4.28 Rodete listo para ser introducido en el horno.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la ilustración 4.5 aparece un rodete tipo Francis, en el momento que se coloca en la bandeja para luego ser introducido dentro del horno y sometido al tratamiento de alivio de tensiones. El montacargas entonces, devuelve la bandeja al horno, se quitan las barras rayadas que soportan la puerta y el montacargas baja la puerta.



Ilustración 4.29 Horno con puerta completamente cerrada, listo para iniciar el calentamiento.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

El tratamiento térmico consiste en calentar los elementos hasta una temperatura cercana pero inferior a la de transformación de la microestructura del material, y mantenerlos en esa condición durante un tiempo para garantizar uniformidad en la distribución de temperaturas y por ende, de las deformaciones térmicas correspondientes. Esto ayuda a que se reduzcan los esfuerzos residuales dado que reduce temporalmente el límite de fluencia del material.

Es importante que si bien el tiempo debe ser suficientemente largo para que la temperatura se uniforme, no puede ser tanto que el acero pierda su carburado. Si bien, los tiempos límites dependen de la geometría y de la aleación, por regla general se puede considerar un máximo de una hora por cada 25 mm del espesor mayor de la pieza [CITATION Geo61 \l 5130]



Ilustración 4.30 Colocación de los termopares dentro del horno.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

La ilustración 4.7 muestra un operador colocando los termopares utilizados para monitorear la temperatura dentro del horno y de la pieza. Los dos mostrados registran la temperatura del aire interior del horno, y el tercero se coloca directamente en la superficie de la pieza.

Los histogramas de temperatura del horno y de la pieza se registran gracias a un sistema digital de recolección de datos que se procesan con el propósito de obtener para cada pieza los siguientes parámetros:

- a) Temperatura inicial (típicamente ambiente).
- b) Velocidad de calentamiento.
- c) Ámbito de variaciones de la temperatura en periodo de estado estable.
- d) Tiempo de permanencia en estado estable.
- e) Velocidad de enfriamiento.
- f) Temperatura de enfriado libre.

En la ilustración 4.8 se muestra físicamente como es el sistema utilizado para registrar los valores antes mencionados. El sistema de recolección de datos tiene capacidad para ocho canales, cada una de señal análoga. La entrada en este caso sería el termopar.

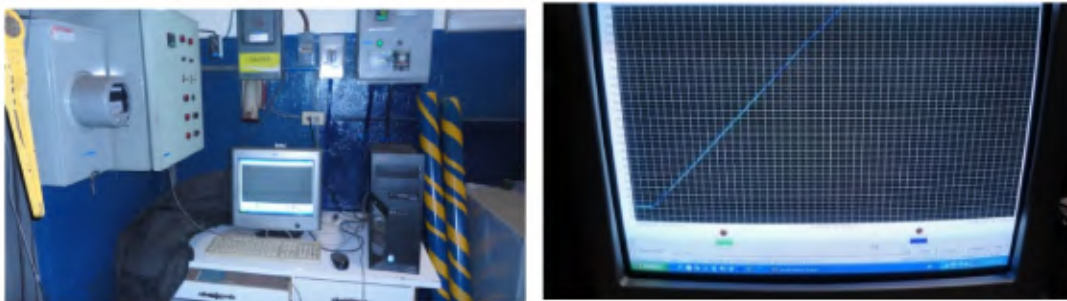


Ilustración 4.31 Sistema de monitoreo de temperatura del horno.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

El sistema de recolección lee el voltaje en la entrada, lo transfiere a un escáner en un comando de dos caracteres que identifica la entrada a ser leída. El software responde con dos caracteres que dan el signo y la magnitud del voltaje [CITATION DCC \1 5130].

Los valores obtenidos con este programa se archivan y al momento de la toma de datos el propósito es mantener un control sobre lo que está sucediendo dentro del horno. En caso se presente alguna anomalía en la temperatura durante el proceso de alivio de tensiones, se podrá fácilmente observar en la pantalla del computador y, si fuera necesario, puede interrumpirse el proceso apagando las resistencias o llevando a cabo la acción pertinente.

Las piezas de acero sometidas al procedimiento de alivio de tensiones en el horno tienen geometría y composición variables y por ende distintos requisitos para su tratamiento. Al ingresar una pieza al

taller, es importante conocer la curva característica de temperatura para los diferentes tratamientos térmicos, la cual indica la temperatura y velocidad de calentamiento que debe entregar el horno, el tiempo en estado estable y la tasa de enfriamiento de término. La importancia de conocer estos datos, radica en que se busca un tratamiento térmico que aumente la resistencia de la pieza sin que queden zonas frágiles. Cuando la pieza está preparada para entrar al horno, este se programa para que las tasas de calentamiento y enfriamiento del elemento coincidan con las que recomienda el fabricante de la pieza o bien un experto en el área y de esta manera alcanzar el resultado esperado.

Durante su tratamiento el operador controla la curva de temperatura desde el computador al que se conectan los termopares, y si llegara a ocurrir alguna anomalía en el transcurso del proceso, como un paro en el funcionamiento o un aumento excesivo de temperatura, entre otros, él se encuentra capacitado para tomar la decisión apropiada y evitar problemas mayores.

4.2 Configuración física del horno actual

Se detallan en el cuadro 4.1 las dimensiones del horno estudiado, valores utilizados como referencia para los cálculos de transferencia de calor, cuyos resultados se muestra más adelante en la sección 4.3.2.

Cuadro 4.7 Dimensiones del horno y bandeja.

Dimensiones del horno	
Largo	2,70 m
Ancho	2,70 m
Alto	1,70 m
Dimensiones bandeja	
Largo	1,80 m
Ancho	1,85 m
Espesor platina	10 mm
Área unitaria (cuadrado)	215 x 200 mm
Espesores	
Acero AISI-SAE 1020	1/8 pulgada
Fibra de vidrio "Insul Quick"	6 pulgadas (puerta)
	5 pulgadas (techo)
	5 pulgadas (pared)

Cada pared del horno, junto con el techo, está formada por dos láminas de acero 1020, y entre las paredes tiene lana de vidrio en láminas semirrígida de cinco pulgadas de espesor como aislamiento térmico.

A continuación se muestran representaciones de la condición actual del horno.

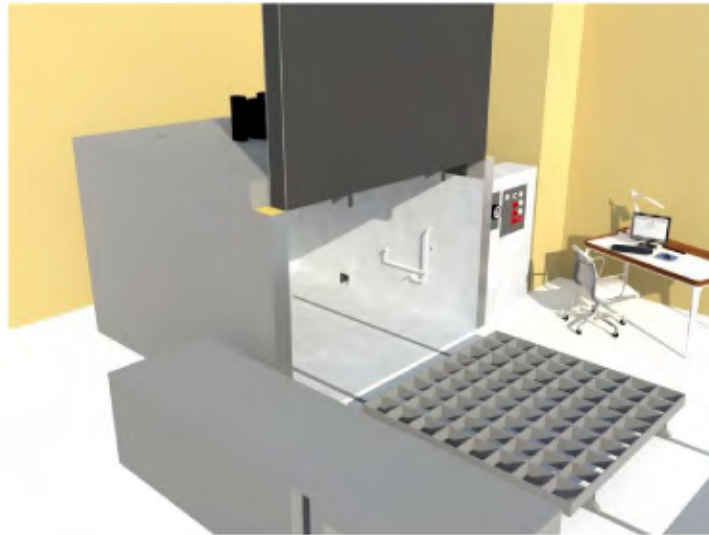


Ilustración 4.32 Ubicación del horno en el espacio físico del Taller Anonos.

Fuente: Los Autores, 2013.

La perforación cuadrada que se observa en la parte inferior de la pared del horno (Ilustraciones 4.9 y 4.10), corresponde a un agujero que se realizó para que el aire caliente en el interior pueda salir en forma controlada para asegurar el enfriamiento paulatino de la pieza.

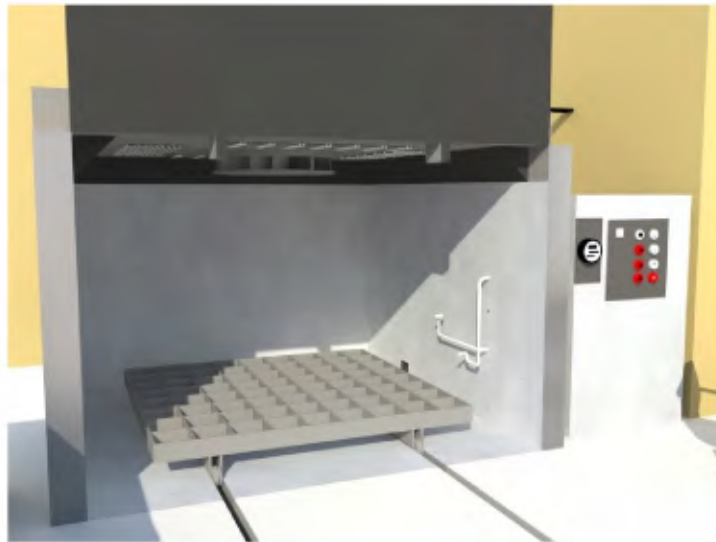


Ilustración 4.33 Vista interna del horno.

Fuente: Los Autores, 2013.



Ilustración 4.34 Vista frontal interna del horno.

Fuente: Los Autores, 2013.

En la ilustración 4.11 se pueden observar los termopares (1) y el orificio cuadrado para ventilación del horno (2) que actualmente tiene el horno.



Ilustración 4.35 Vista interior del techo del horno. Paneles de resistencias y ventilador.

Fuente: Los Autores, 2013.

La operación de las resistencias se programa para que la temperatura dentro del horno se incremente a una tasa determinada. Esta tasa la eligen para cada carga individual los metalurgos del Taller Anonos aunado a la experiencia del personal de taller.

Según información suministrada por el personal del Taller Anonos, si en el transcurso del calentamiento este valor sube más rápido de lo debido, las resistencias se apagan por un tiempo suficiente para retrasar el proceso, pero eventualmente se vuelven a activar para continuar con el calentamiento

En la ilustración 4.12 se observa el ventilador que actualmente posee el horno para direccionar el aire caliente hacia la pieza que está siendo sometida a tratamiento térmico. Con esta configuración el aire es enviado hacia las paredes por medio de un abanico, primeramente pasando por las resistencias y luego a las paredes. El aire choca con las paredes y ahí se produce un problema ya que esto provoca que se haga más pequeña la resistencia térmica hacia el ambiente, es decir, existe un desperdicio de calor a una misma temperatura de operación.

4.3 Balance energético del horno

El balance energético del horno lo compone principalmente el calor necesario para llevar el horno y la pieza a su temperatura de tratamiento y las pérdidas a través de paredes, techo y piso. Este calor lo debe proveer el sistema de calentamiento, que en este caso lo componen las resistencias eléctricas de potencia del horno.

En suma, una vez que ha alcanzado estado estable, las resistencias eléctricas deben suplir únicamente las pérdidas a través de la frontera del horno, por lo que el aislamiento es un punto crítico de diseño. El aislamiento afecta directamente la máxima temperatura a la que puede llegar el horno para una potencia térmica determinada, así como el período demandado para llegar a una temperatura preestablecida y los períodos de enfriamiento asociados.

En hornos industriales, los aislamientos pueden adoptar la forma de pared plana en el cuerpo del horno, de pared cilíndrica en tuberías y de pantallas de radiación en hornos de vacío.

La transmisión de calor a través de un material poroso es un fenómeno de transporte complejo, debido a que intervienen los tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación.

4.3.1 Fenómenos de transferencia de calor

La ley fenomenológica que rige la conducción del calor fue propuesta por el físico y matemático francés J. B. Fourier. En esta sección se muestra una aplicación de dicha ley que es el caso del flujo unidimensional de calor a través de una pared plana homogénea con sección transversal constante. La 4.13 muestra una pared plana de área A y espesor L , cuya cara en $x = 0$ se mantiene a la temperatura T_1 , mientras que el lado en $x = L$ se mantiene a T_2 . El flujo de calor \dot{Q} (J/s) a través de la pared se efectúa en la dirección de la disminución de la temperatura. La ley de Fourier establece que, la densidad de flujo de calor, q , (Cantidad de calor que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo, [W/m²],) viene dada por:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q = -k \frac{dT}{dx}$$

En donde T es la temperatura local [K o °C], x es la coordenada en la dirección del flujo [m] y k es la conductividad térmica de la sustancia, cuyas unidades son los [W/(m K)].

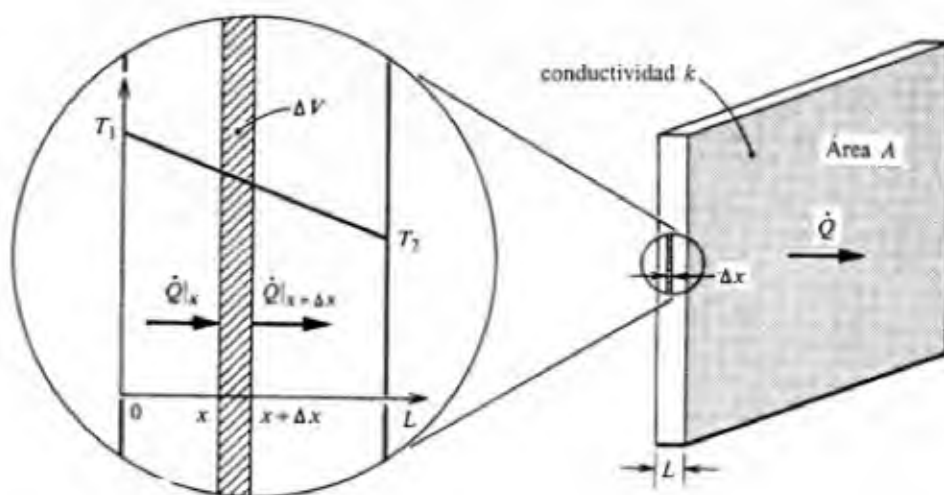


Ilustración 4.36 Conducción unidimensional estacionaria a través de una pared plana

Fuente: Cengel, 2006

La conductividad térmica es un parámetro que depende del tipo de material (depende de manera crucial de su estructura microscópica) y de la temperatura y representa la cantidad de calor conducido por unidad de tiempo a través de la unidad de área (perpendicular a la dirección del transporte de calor) cuando el gradiente de temperatura a través del elemento conductor del calor es la unidad.

Reordenando e integrando la ecuación de flujo de calor sobre el espesor de la pared, se tiene:

$$q \int_0^L dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (39)$$

Donde q y A se han sacado de la integral porque son constantes. Si se asume pequeña la variación de k con la temperatura, se obtiene:

$$q = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{ter}} = \frac{\Delta T}{R_{ter}} \quad (40)$$

La comparación de la ecuación con la ley de Ohm, $I = \frac{V}{R}$, sugiere que $\Delta T = T_1 - T_2$ puede verse como un potencial impulsor del flujo de calor, así como el voltaje es el potencial impulsor de la corriente eléctrica. Entonces $R_{ter} = \frac{L}{k}$, puede considerarse como una resistencia térmica análoga a la resistencia eléctrica.

Si se tiene una pared compuesta por dos placas de material, como se muestra en la ilustración 4.2, el flujo de calor a través de cada placa es igual:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_A}{k_A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{k_B}} \quad (41)$$

Reordenando,

$$q \left(\frac{L_A}{k_A} \right) = T_1 - T_2, q \left(\frac{L_B}{k_B} \right) = T_2 - T_3 \quad (42)$$

Sumando las dos ecuaciones anteriores se eliminan la temperatura de la cara interna T_2 :

$$q \left(\frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} \right) = T_1 - T_3 \quad (43)$$

Es decir:

$$q = \frac{T_1 - T_3}{\left(\frac{L_A}{k_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B}\right)} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B} \quad (44)$$

Recurriendo a la analogía eléctrica este problema se ve como un circuito térmico formado por dos resistencias en serie y se escribiría inmediatamente:

$$q = \frac{\Delta T}{R_A + R_B} \quad (45)$$

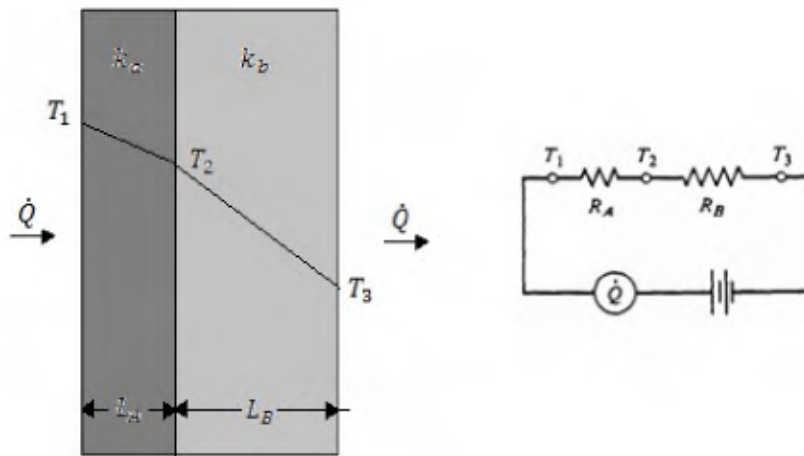


Ilustración 4.37 Distribución de temperaturas para conducción estacionaria a través de una pared plana compuesta y el circuito térmico correspondiente

Fuente: Cengel, 2006.

Este modelo se limita a los cuerpos para los que se conocen las temperaturas de contorno, lo que no es típico en la mayoría de los casos de interés. Generalmente, las superficies de un cuerpo están en contacto con un fluido con condiciones termodinámicas conocidas

Las características termo físicas y el estado dinámico del fluido resultarán en una capa límite en la superficie del sólido que tiene relación directa con la velocidad de intercambio de calor entre la masa del fluido y la superficie en cuestión. El efecto de esta interfase se puede modelar como una resistencia a la transmisión de calor, dispuesta en serie con el grupo de resistencias de tipo conductivo que se usen para modelar el sólido.

Dicha resistencia se puede denominar resistencia superficial unitaria, R_s , que es el inverso del coeficiente de transferencia de calor por convección

$$R_s = \frac{1}{hc} \quad (46)$$

El mecanismo de transporte de calor por convección, al que no es aplicable la ley de Fourier, se presenta en el flujo de calor entre un fluido y un sólido, tanto desde el fluido al sólido, por estar el primero a mayor temperatura, como en sentido contrario si la temperatura del fluido es la menor. Es el mecanismo de transferencia de calor en todas aquellas operaciones de transporte de calor en fluidos. En esta modalidad se produce transporte de materia.

El proceso real de la transmisión de energía de una partícula o molécula del fluido a otra, sigue siendo un proceso de conducción, pero la energía se transporta de un punto a otro del espacio merced al desplazamiento del propio fluido (Movimiento del medio), bien por medio de las variaciones de densidad o bien por medios artificiales. En este sentido, un sólido en movimiento también puede transportar energía calorífica por convección. Es virtualmente imposible observar la conducción de calor de un punto a otro en el seno de un fluido, ya que tan pronto como exista una diferencia de temperatura en él, se producirán corrientes de convección como consecuencia de la diferencia de densidades.

El transporte de calor mediante este mecanismo estará influenciado por la libertad de movimiento del fluido y por su densidad, así cuanto más denso y más libertad de movimiento tenga el fluido más efectivo será el transporte de calor por este mecanismo.

La dimensión, forma y orientación del cuerpo (por ejemplo, huecos, poros, etc.) que contiene al fluido son factores que influyen sobre el transporte de calor por convección, así este puede controlarse o incluso eliminarse mediante la creación de pequeños cuerpos dentro de los cuales los gradientes de temperatura sean pequeños.

En régimen de transporte estacionario la ley fundamental de la convección se conoce con el nombre de ley de enfriamiento de Newton:

$$q = \frac{Q}{A} = h_c (T_s - T_f) = h_c \Delta T \quad (47)$$

El término h_c es el "coeficiente de transmisión de calor por convección", o "coeficiente de película". Se trata de una conductancia térmica equivalente, y no de una propiedad del material. Sus unidades

son ($W/m^2 K$). El término T_s es la temperatura de la superficie sólida en contacto con el fluido y T_f es la temperatura del fluido alejado de la superficie.

4.3.2 Modelo de capacidad térmica global del horno

La idea fundamental es analizar el comportamiento del horno en su condición actual utilizando las ecuaciones de transferencia de calor estudiadas hasta el momento.

El estudio de la transferencia de calor por medio de resistencias, es un método comúnmente usado para el análisis de sistemas cerrados sin flujo de masa; y por lo tanto, se debe iniciar con una recopilación previa de datos indispensables para poder realizar las ecuaciones y cálculos respectivos.

También hay que establecer las ecuaciones con que se va a trabajar, ya que varios elementos afectan directamente en la transferencia de calor. Estos factores son el aire del interior, la masa que está siendo calentada, las paredes del horno, el aire del ambiente, las resistencias que introducen el calor, los materiales de cada elemento y hasta las formas físicas de los componentes.

Circuito térmico base:

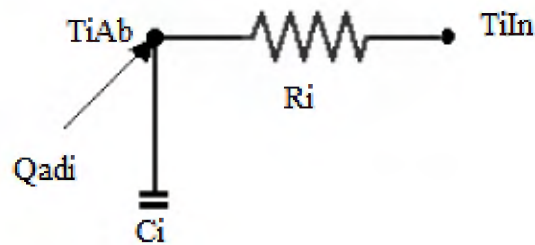


Ilustración 4.38 Circuito térmico base

Fuente: Los Autores, 2013.

Todas las ecuaciones que se necesitan para componer el circuito térmico, se generan a partir del arreglo anterior, en donde el diferencial de la temperatura con respecto al tiempo es la ecuación que compone a la capacitancia térmica del elemento, el cual indica la cantidad de calor que puede absorber el mismo, multiplicado por el calor absorbido y el inducido, junto con la resistencia que el material posee ante la obtención de este calor.

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \left(\frac{1}{C_i} \right) \cdot \left(\frac{-T_{i_{AB}}}{R_i} + \frac{T_{i_{IN}}}{R_i} \pm Q_{adi} \right)$$

Donde:

$\frac{\partial T_i}{\partial t}$ = \dot{t} Diferencial de la temperatura de un elemento con respecto al tiempo.

C_i = Capacidad térmica del elemento.

$T_{i_{AB}}$ = Temperatura absorbida por el elemento.

$T_{i_{IN}}$ = Temperatura inducida hacia el elemento.

Q_{adi} = Calor proveniente de fuentes externas.

R_i = Resistencia del material al absorber el calor.

Inicialmente para generar las ecuaciones, se establecen las medidas del horno para poder calcular el volumen de masa que puede contener, que contemplar que el aire interno circundante, la masa en tratamiento térmico y las resistencias eléctricas junto con los accesorios de movimiento del aire, están ocupando ese espacio específico. De igual manera, las medidas son necesarias para obtener las áreas de paredes y techo para efectos de cálculo de pérdidas de calor al ambiente.

Cuadro 4.8 Dimensiones físicas del horno

Dimensiones del horno	
Altura	1,70 m
Longitud	2,70 m
Profundidad	2,70 m
Volumen	12,40 m ³

Fuente: Los Autores, 2013

Para poder iniciar con el análisis de transferencia de calor, se inicia por utilizar las constantes de transferencia de la pieza en calentamiento, estos datos importantes son obtenidos de la *Compañía Nacional de Fuerza y Luz*, donde hay un coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 410 de 21 W/(m·K) y un calor específico de 460 J/(kg·K), que son las especificaciones necesarias para la transferencia de calor. La pieza en tratamiento se analiza geométricamente como un toroide, debido a su forma, la cual representa mejor a un rotor de turbina hidráulica. Este toroide cuenta con un radio generatriz, un radio interno, un espesor y un área transversal, además también es necesario conocer la masa total de este elemento.

Cuadro 4.9 Dimensiones de la pieza

Dimensiones de la pieza

Radio generatriz	0,392 m
Radio interno	0,30 m
Espesor	0,34 m
Área transversal	4,64 m ²
Masa	2500 kg

Fuente: Los Autores, 2013.



Ilustración 4.39 Pieza tratada térmicamente
Fuente: Los Autores, 2013.

En el caso del aire circundante dentro del horno la temperatura final es de 673 K debido a que es la del calentamiento. La temperatura inicial es la del ambiente y corresponde a 296 K, y la presión a la que se encuentra el aire es la atmosférica que se considerará de 101 kPa. La constante de gas ideal en estas condiciones es de $R=0.287$ (kPa·m³/kg·K) con un calor específico de 1007 (J/ (kg·K)). Para poder discernir cuanta masa de aire se encuentra dentro del horno se aplica la ecuación de gas ideal según las condiciones de operación:

$$M_{\text{aire}} = \frac{(Presión \cdot Volumen)}{(R \cdot Temp. inicial)} \quad (49)$$

En cuanto a las paredes del horno, hay que considerar las capas de material que las componen para obtener un coeficiente de transferencia de calor lo más certero posible.

Para empezar una lámina de acero AISI 1020 compone la capa exterior de la pared del horno que está en contacto con la temperatura ambiente. En el cuadro 4.4 se puede observar las diferentes características que son esenciales para realizar los estudios de transferencia, como los son el coeficiente de conductividad térmica, espesor y área. En el interior de la pared del horno hay una lámina de aislante “*Insulquick*” que es un elemento de fibra de vidrio, seguidamente la lámina de

aislante se encuentra recubierta por una lámina de acero inoxidable, la cual está en contacto con el aire interno circundante del horno. Estos datos fueron obtenidos de la *Compañía Nacional de Fuerza y Luz*.

Cuadro 4.10 Características de los componentes de la pared del horno

Componente	Coefficiente de conductividad	Espesor	Área
AISI 1020	50 W/ (m·K)	3,175 mm	4,671 m ²
Aislante “Insulquick”	0,035 W/ (m·K)	127 mm	4,671 m ²
Acero Inoxidable	15 W/ (m·K)	3,175 mm	4,671 m ²

Fuente: Los

2013

Autores,

Las tres paredes laterales junto con el techo y la puerta, conforman la masa total del horno que es de 1320 kg y un calor específico de 473 J/(kg·K), el cual es un promedio ponderado de los calores específicos de cada componente que conforma la construcción de la pared. El cálculo de la masa se realizó con la densidad de cada componente y el volumen, de esta forma la masa total se obtiene con una simple multiplicación.

Cuadro 4.11 Cálculo de la masa de las paredes del horno

Componente	Densidad (D)	Volumen (V)	Masa (D·V)
AISI 1020	7 870 kg/ m ³	0,015 m ³	117 kg
Aislante Insulquick	48 kg/ m ³	0,59 m ³	28 kg
Acero Inoxidable	8 000 kg/ m ³	0,015 m ³	119 k

Fuente: Los Autores, 2013



Ilustración 4.40 Paredes del horno y sus componentes

Fuente: Los Autores, 2013

Para el piso del horno se contempla una lámina de acero inoxidable 304 que conforma la parte interna del horno seguido de un espacio de aire, luego continua la formación de cemento del taller. Para calcular el flujo de calor que se transmite por estos elementos, se aplicó el mismo sistema de ecuaciones análogas de resistencias contemplando los datos técnicos de cada material. El calor específico del acero inoxidable, su coeficiente de conductividad térmica, el área transversal de lámina y el espesor. Para calcular la masa de la lámina es necesario conocer su densidad; con este valor se obtiene su masa total. Para el concreto se cuenta con un espesor límite de 10 pulgadas que sería la profundidad de concreto en donde descansa el horno y la misma área transversal del piso se utiliza para el concreto; los datos necesarios del concreto son, el coeficiente de conductividad térmica, el calor específico y la densidad, de esta manera se puede calcular la masa total del cemento.

Cuadro 4.12 Cálculo de la masa del piso del horno

Componente	Coficiente de conductividad	Calor específico	Densidad (D)	Espesor (E)	Área (A)	Masa (D·E·A)
Acero Inoxidable	15 (W/ (m·K))	500 (J/(kg·K))	8.000 kg/m ³	6,35e ⁻³ m	4,671 m ²	237 kg
Concreto	1,4 (W/(m·K))	840 (J/(kg·K))	2.400 kg/m ³	254e ⁻³ m	4,671 m ²	2847 kg

Fuente: Los Autores, 2013

En cuanto a las resistencias del horno, se requieren establecer parámetros del material con el cual están construidas; este material es en su mayoría una aleación de níquel y cromo, llamado *nicromo* y sus propiedades de transferencia de calor se establecen como 17,5 W/(m·K) para la conductividad térmica y 90 (J/(kg·K)) para el calor específico. En la construcción actual las resistencias tienen una potencia nominal de 57,64 kW dispuestas en 36 m de longitud y una masa total de 50 kg.



Ilustración 4.41 Resistencias, principal fuente de calor
Fuente: Los Autores, 2013

Como se explicó en la ilustración 4.12 el aire es enviado hacia las paredes por medio de un abanico, primeramente pasando por las resistencias y luego a las paredes. El aire choca con las paredes y ahí se produce un problema ya que esto provoca que se haga más pequeña la resistencia térmica hacia el ambiente, es decir, existe un desperdicio de calor a una misma temperatura de operación. En la ilustración 4.18 se puede ver esta condición. Por esta razón conviene colocar deflectores de aire que tenga la propiedad de ser resistentes al calor y direccionen el flujo de aire caliente mayoritariamente hacia la pieza a tratar y hacia las paredes.

Observando la configuración en que se encuentran las resistencias dentro del horno, ilustración 4.18, se obtiene el área transversal que debe ser perpendicular al flujo de calor que es de $2,15 \text{ m}^2$. El radio de la resistencia que el calor debe atravesar es de $4,76 \text{ mm}$ ($3/16$ de pulgada).

La configuración eléctrica de las resistencias en la parte del techo y paredes es de tipo delta, como se observa en la ilustración 4.19.

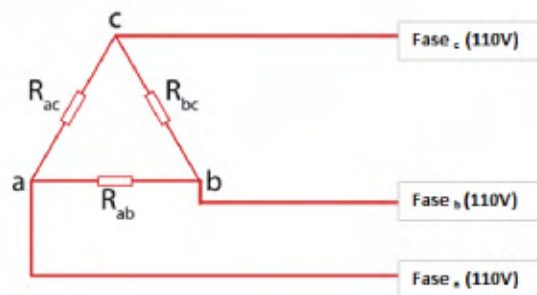


Ilustración 4.42 Configuración del panel de resistencias

Fuente: Los Autores, 2013.

La potencia total que aportan las resistencias eléctricas se calculan de la siguiente manera:

$$I_L = \sqrt[2]{3} \cdot I_f$$

$$I_f = 40 \text{ A}$$

$$\text{Potencia} = I_L \cdot V \quad (51)$$

$$\text{Potencia} = \sqrt[2]{3} \cdot I_f \cdot 208 \text{ V}$$

$$\text{Potencia de cada conjunto de resistencias} = \sqrt[2]{3} \cdot 40 \cdot 208$$

$$\text{Potencia de cada conjunto de resistencias} = \sqrt[2]{3} \cdot 40 \cdot 208$$

$$\text{Potencia de cada conjunto de resistencias} = 14,41 \text{ kW}$$

El diseño cuenta con cuatro conjuntos de resistencias, entonces.

$$\text{Potencia total} = 14,41 \text{ kW} \cdot 4 = 57,64 \text{ kW}$$

Esta potencia se calculó analizando la configuración en delta de las resistencias conectadas a 110 V trifásico con una corriente promedio de 40 A. La potencia generada por las resistencias se calculó midiendo el amperaje por cada línea que salía de los contactores y analizando la configuración de estas se encontró la potencia nominal de los 57,64 kW.

La potencia eléctrica que dan las resistencias no es suficiente para que la masa de la pieza se caliente de manera uniforme y dentro del tiempo esperado; esto significa que debe incrementarse su potencia neta para satisfacer la demanda de energía.

Cuando se elige modelar un fenómeno térmico transitorio como un sistema concentrado, se hace en términos de resistencias térmicas y de capacidad calórica para los elementos involucrados. Lo usual en sistemas térmicos reales es que, en un elemento aislante con alta resistencia al flujo de calor presenta capacidad calórica relativamente despreciable, mientras que elementos que son buenos conductores pero alta masa térmica presentan relativamente poca resistencia al flujo de calor. Las ecuaciones de resistencia y capacitancia de los elementos están asociadas a una serie de variables necesarias para el desarrollo matemático por lo tanto, se agruparon en el cuadro 4.7 para comprender mejor el sistema de transferencia de calor.

Cuadro 4.13 Ecuaciones de capacitancia térmica

Ecuaciones de Capacitancia Térmica	
$C_{pa} = M_{pa} \cdot C_{epa}$	(52)
C_{pa}	Capacitancia térmica de la pared
M_{pa}	Masa de la pared
C_{epa}	Coefficiente de calor específico de la pared
$C_{pi} = M_{pi} \cdot C_{epi}$	(53)
C_{pi}	Capacitancia térmica de la pieza
M_{pi}	Masa de la pieza
C_{epi}	Coefficiente de calor específico de la pieza
$C_a = M_a \cdot C_{ea}$	(54)
C_a	Capacitancia térmica del aire
M_a	Masa del aire
C_{ea}	Coefficiente de calor específico del aire
$C_r = M_r \cdot C_{er}$	(55)
C_r	Capacitancia térmica de las resistencias
M_r	Masa de las resistencias
C_{er}	Coefficiente de calor específico de las resistencias
$C_f = M_f \cdot C_{ef}$	(56)
C_f	Capacitancia térmica del piso del horno
M_f	Masa del piso del horno
C_{ef}	Coefficiente de calor específico del piso del horno

Fuente: Los Autores, 2013.

Cuadro 4.14 Ecuación de resistencia térmica R1

Resistencia térmica 1 (R1)	
$R1 = \frac{1}{HC_{ex} \cdot A_{ext}} + \frac{L_{1020}}{k_{1020} \cdot A_{1020}} + \frac{L_{ais}}{K_{ais} \cdot A_{ais}}$	(57)
HC_{ex}	Coefficiente de convección externa, W/m ² ·K
A_{ext}	Área transversal externa de la pared, m ²
L_{1020}	Espesor de la lámina de acero 1020, m
A_{1020}	Área transversal de la lámina de acero 1020, m ²
k_{1020}	Coefficiente de conductividad térmica del acero 1020, W/m·K
L_{ais}	Espesor de la lámina de aislante, m
K_{ais}	Coefficiente de conductividad térmica del aislante, W/m·K
A_{ais}	Área transversal del aislante, m ²

Fuente: Los Autores, 2013.

La resistencia térmica 1 (R1), mostrada en el cuadro 4.8, es la suma de las resistencias que se encuentran desde el aire ambiente hasta el punto medio de las paredes del horno, se toman en cuenta la resistencia de convección del aire con la superficie externa y la conducción de los componentes de la pared hasta llegar al punto medio de la misma.

Cuadro 4.15 Ecuación de resistencia térmica R2

Resistencia térmica 2 (R2)	
$R2 = \frac{1}{HC_{in} \cdot A_{int} + \frac{L_{ais}}{K_{ais} \cdot A_{ais}} + \frac{L_{inox}}{K_{inox} \cdot A_{inox}}}$	(58)
HC_{in}	Coefficiente de convección interno, W/m ² ·K
A_{int}	Área transversal interna de la pared, m ²
L_{inox}	Espesor de la lámina de acero inoxidable, m
K_{inox}	Coefficiente de conductividad térmica del acero inoxidable, W/m·K
A_{inox}	Área transversal de la lámina de acero inoxidable, m ²

Fuente: Los Autores, 2013.

La resistencia térmica 2 (R2), cuadro 4.9, comprende las resistencias que se ubican desde el centro de las paredes del horno hasta el interior del mismo, se toman en cuenta las resistencias de conducción de los elementos de la pared y la resistencia de convección de la superficie de la misma con el aire circundante interno.

Cuadro 4.16 Ecuación de resistencia térmica R3

Resistencia térmica 3 (R3)	
$R3 = \frac{1}{HC_{pie} \cdot A_{pie}} + \frac{L_{pie}}{K_{pie} \cdot A_{pie}}$	(59)
HC_{pie}	Coficiente de convección de la pieza con el aire interno del horno, W/m ² ·K
A_{pie}	Área transversal de la pieza, m ²
L_{pie}	Espesor de la pieza, m
K_{pie}	Coficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 410, W/m·K

Fuente: Los Autores, 2013

La resistencia térmica 3 (R3), cuadro 4.10, es la suma de las resistencias que comprenden desde el aire interno del horno hasta el interior de la pieza en calentamiento, se toma en cuenta las resistencias de convección y de conducción de la pieza.

Cuadro 4.17 Ecuación de resistencia térmica R4

Resistencia térmica 4 (R4)	
$R4 = \frac{1}{HC_{res} \cdot A_{res}} + \frac{L_{res}}{K_{res} \cdot A_{res}}$	(60)
HC_{res}	Coficiente de convección entre las resistencias y el aire interno, W/m ² ·K
A_{res}	Área transversal de las resistencias, m ²
L_{res}	Espesor de la resistencias, m
K_{res}	Coficiente de conductividad térmica de las resistencias, W/m·K

Fuente: Los Autores, 2013

La resistencia térmica 4 (R4), cuadro 4.11, comprende las resistencias que se ubican desde las resistencias que son la fuente de calor del horno hasta el aire interno del horno, se toma en cuenta la convección y la conducción de la misma

Cuadro 4.18 Ecuación de resistencia térmica R5

Resistencia térmica 5 (R5)	
$R5 = \frac{1}{HC_{int} * A_{int}} + \frac{L_{inoxF}}{K_{inoxF} * A_{inoxF}} + \frac{L_{cem}}{K_{cem} * A_{cem}}$	(61)
HC_{in}	Coefficiente de convección interno, W/m ² ·K
A_{int}	Área transversal interna de la pared, m ²
L_{inoxF}	Espesor de la lámina de acero inoxidable 304 del piso del horno, m
K_{inoxF}	Coefficiente de conductividad térmica del acero inoxidable, W/m·K
A_{inoxF}	Área transversal de la lámina de acero inoxidable, m ²
L_{cem}	Es el espesor de la capa de concreto donde descansa el horno, m
K_{cem}	Coefficiente de conductividad térmica del concreto, W/m·K
A_{cem}	Área transversal del concreto, m ²

Fuente: Los Autores, 2013.

La resistencia térmica 5 (R5), cuadro 4.12, comprende las resistencias que se ubican desde el interior del horno hasta diez pulgadas de profundidad de concreto que conforman el piso del mismo, en donde se encuentra posicionado, se toma en cuenta la convección interna del aire con el acero y la conducción tanto de la lámina como del cemento posterior.

Para el análisis de transferencia de calor del horno, se utilizan las siguientes ecuaciones diferenciales se debe tener claro que se parte del modelo matemático de capacitancia térmica donde:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (q_{entrada} - q_{salida}) \quad (62)$$

El cual incluye un balance de energía ($q_e - q_s$); cada uno de los términos de dicho balance se sustituyen con las ecuaciones de resistencia térmica de la forma $(T_i - T_j)/R_i$, de esta forma se obtienen las ecuaciones propuestas para trabajar el funcionamiento del horno las cuales se basan en el método análogo de resistencias como se mencionó al inicio de este capítulo, de igual manera, es importante relacionar estas ecuaciones con todos los datos proporcionados anteriormente para poder desarrollarlas y obtener los resultados esperados.

$$\frac{\partial z(1)}{\partial t} = \left(\frac{1}{C_{pared}} \right) \cdot \left(\frac{T_{amb}}{R1} + \frac{z(3)}{R2} - \frac{z(1)}{R1} - \frac{z(1)}{R2} \right) \quad (63)$$

$$\frac{\partial z(2)}{\partial t} = \left(\frac{1}{C_{pieza}} \right) \cdot \left(\frac{z(3)}{R3} - \frac{z(2)}{R3} \right) \quad (64)$$

$$\frac{\partial z(3)}{\partial t} = \left(\frac{1}{C_{aire}} \right) \cdot \left(- \left(\frac{z(3)}{R2} + \frac{z(3)}{R3} + \frac{z(3)}{R4} + \frac{z(3)}{R5} \right) + \frac{z(1)}{R2} + \frac{z(2)}{R3} + \frac{z(4)}{R4} + \frac{z(5)}{R5} - q_{ad} \right) \quad (65)$$

$$\frac{\partial z(4)}{\partial t} = \left(\left(\frac{1}{C_{resistencias}} \right) \cdot \left(\frac{-z(4)}{R4} + \frac{z(3)}{R4} + qr \right) \right) \quad (66)$$

$$\frac{\partial z(4)}{\partial t} = \left(\left(\frac{1}{C_{resistencias}} \right) \cdot \left(\frac{-z(4)}{R4} + \frac{z(3)}{R4} + qr \right) \right) \quad (67)$$

Se utilizará un software para poder desarrollar estas ecuaciones diferenciales, debido a que son un sistema de ecuaciones con solución no lineal. Esto se debe a que hay que modelar las etapas transitorias del proceso de tratamiento térmico.

Los valores denotados como $z(1)$, $z(2)$, $z(3)$, $z(4)$ y $z(5)$; son equivalentes a las temperaturas que tendrán los elementos del sistema a lo largo del período de trabajo, desde el momento en el cual el horno empieza el calentamiento hasta llegar al final del mismo. Estos valores al no ser variables constantes serán almacenados en diferentes posiciones dentro de la matriz, cuyos nombres serían “ $z(x)$ ”, donde “ z ” es el nombre aleatorio que se le asignó a la matriz y “ x ” será la posición en donde se encuentra el valor de la temperatura para cada elemento del sistema. Todo este proceso es necesario para poder graficar el comportamiento de cada elemento a lo largo del tiempo en el que se calienta, y de esta forma se puede obtener una ecuación de mejor ajuste para cada uno de los componentes del sistema térmico.

Los valores se asignaron de la siguiente manera en el cuadro 4.13

Cuadro 4.19 Denominación de las variables de temperatura en estado transitorio

Cambios de variable	
$z(1)$	Temperatura a lo largo del tiempo de las paredes del horno en grados Celsius.
$z(2)$	Temperatura a lo largo del tiempo de la pieza sometida a calentamiento en grados Celsius.
$z(3)$	Temperatura en grados Celsius correspondiente al aire circundante dentro del horno.
$z(4)$	Temperatura en grados Celsius correspondiente a las resistencias, las cuales son fuente de calor.
$z(5)$	Temperatura del hormigón debajo del horno a diez pulgadas del mismo.

Fuente: Los Autores, 2013.

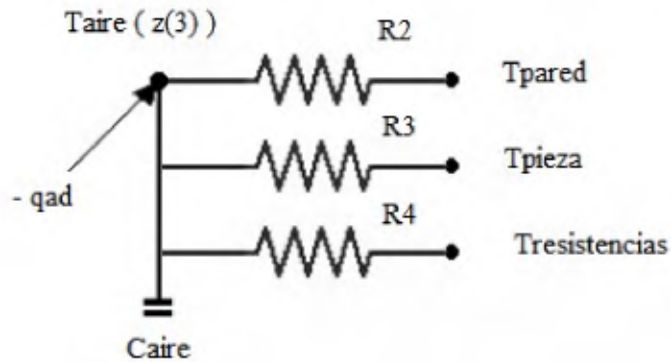


Ilustración 4.43 Circuito térmico para la temperatura del aire.

Fuente: Los Autores, 2013.

De esta manera, con la ilustración 4.20 se pueden establecer los circuitos para cada uno de los elementos partiendo como base de la ilustración 4.15 presentado en la sección 4.3.2, los cuales se ejemplifican de mejor manera en los apéndices desde 7.1 hasta el 7.6, se busca generar un sistema compuesto por la resistividad de los materiales al flujo de calor que proporcionan los demás elementos en su entorno, así como la cantidad de calor que puede almacenar y el calor inducido o extraído del sistema por alguna situación externa, de esta manera se contempla el flujo de calor en

todas direcciones y se tiene un mejor modelo matemático para poder simular el comportamiento del horno.

4.4 Orificios en las paredes y techo

El calor se pierde también por perforaciones abiertas en una pared y en el techo del horno. Estos orificios se hicieron para facilitar el enfriamiento del hogar cuando la pieza dentro lo requiera. Los agujeros producen dos problemas:

Mientras el horno se está calentando, con la pieza adentro, el agujero permanece abierto, por lo que escapa el aire caliente, lo que puede afectar la uniformidad de temperatura en el hogar y los tiempos de calentamiento.

El objetivo de ambas perforaciones al momento de su realización era ser un instrumento para poder enfriar el horno una vez que el proceso de calentamiento acabe. Para obtener un resultado aceptable y para que los orificios puedan cumplir su función, generalmente se adiciona un sistema de extracción de aire, que expulse el aire caliente; sin un ventilador el enfriamiento se da, pero a una tasa muy baja, que no es la esperada. Sin un sistema de extracción los agujeros cumplen su función pero no completamente, puesto que resulta ser muy lento el proceso.

Dentro de este tipo de pérdidas se incluyen todo lo referente a puertas auxiliares, si existen aberturas de la puerta principal en el transcurso de la operación del horno, ranuras longitudinales, juntas en los ejes de los ventiladores de recirculación, la salida de los gases de combustión, entre otros.

Las pérdidas de calor por radiación se calculan por medio de la siguiente fórmula, y se utiliza un factor de corrección o factor de forma debido al espesor de la pared o puerta del horno.

$$R=0,00567 \quad (68)$$

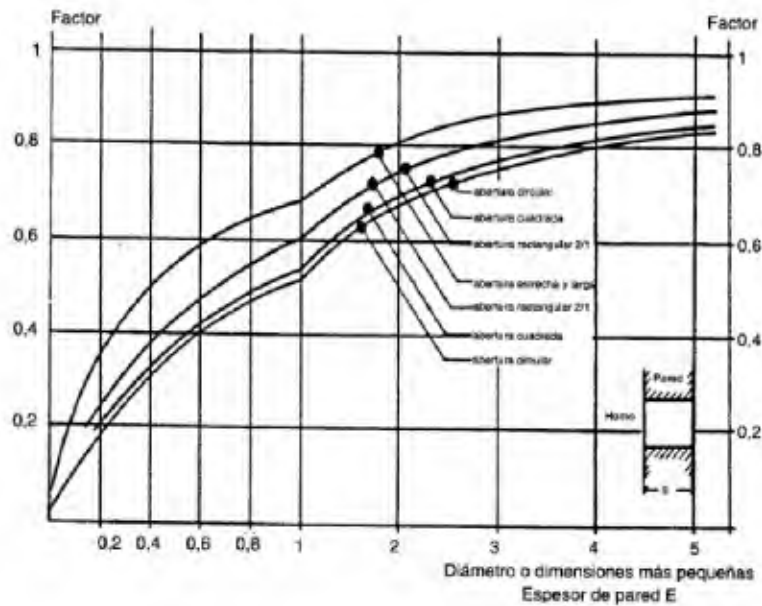
Esta fórmula resulta ser la radiación del cuerpo de negro generado por alguna ranura, orificio, apertura de puerta etc. Se calcula dicha pérdidas para cada una de estas y finalmente se suman para encontrar las pérdidas por aberturas. Para el caso de este horno se considera el orificio hecho en el techo, el orificio en una de las paredes como medio para evacuar gases, y la junta por donde el eje del ventilador entra al horno.

$$R_{\text{orificio techo}} = R_{\text{orificio pared}} = R_{\text{orificio junta eje}} = 0,00567$$

$$R=11,63 \text{ kW/m}^2$$

Los factores de corrección se calculan con ayuda del gráfico 4.1:

Gráfico 4.1 Factor de corrección para pérdidas por aberturas



Fuente: Universidad de Oviedo, Hornos Industriales 2006

Las aberturas por el orificio del techo y la pared son aberturas cuadradas con un espesor de pared de 5,25 pulgadas de espesor de pared. Según se puede observar en la gráfica el factor de corrección es de 0,85 aproximadamente, y para la junta para el eje del ventilador se tiene una abertura circular con un factor de corrección alrededor de 0,85. Es decir las pérdidas totales son:

$$R_{\text{orificio techo}} = 11,63 \cdot 0,85 = 9,89 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$R_{\text{orificio pared}} = 11,63 \cdot 0,85 = 9,89 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$R_{\text{orificio junta eje}} = 11,63 \cdot 0,85 = 9,89 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Una vez obtenidos las pérdidas que generan cada abertura por unidad de área se calcula la pérdida total por aberturas del sistema. Para ello es necesario calcular las áreas de dichas aberturas.

$$A_{\text{orificio techo}} = 0,1 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{orificio pared}} = 0,075 \text{ m} \cdot 0,075 \text{ m} = 0,0056 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{orificio junta eje}} = \frac{\pi (0,0191)^2}{4} - \frac{\pi (0,0127)^2}{4} = 0,00020 \text{ m}^2$$

Entonces la pérdida total por aberturas es:

$$R_{\text{orificio techo}} = 9,89 \cdot 0,01 = 0,099 \text{ kW}$$

$$R_{\text{orificio pared}} = 9,89 \cdot 0,0056 = 0,055 \text{ kW}$$

$$R_{\text{orificio junta eje}} = 9,89 \cdot 0,00020 = 0,0019 \text{ kW}$$

$$R_{\text{total}} = 0,156 \text{ kW}$$

Por tanto, se introduce este valor al sistema de ecuaciones como *qad* que son las pérdidas adicionales externas al sistema, las cuales afectan la eficiencia actual del horno.

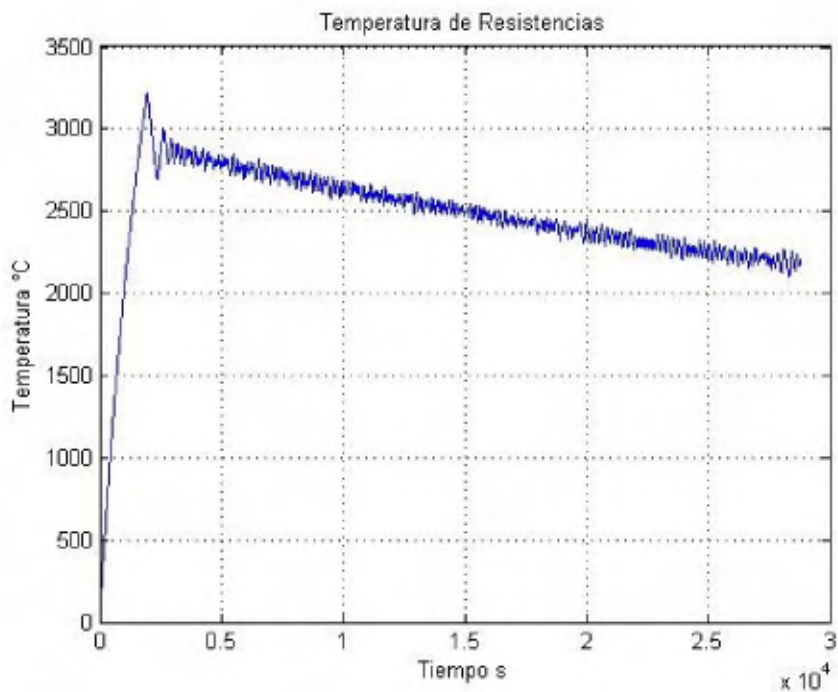
4.5 Modelado matemático del horno en condiciones actuales.

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales recién descritas, se puede usar el lenguaje de programación asociado a MatLab para obtener soluciones numéricas expeditas.

El funcionamiento del horno se basa en iniciar un calentamiento a base de resistencias eléctricas, las cuales calentarán el ambiente interno del horno y por ende la pieza a tratar será calentada. Para obtener una temperatura deseada es necesario inducir bastante temperatura, por tanto, en el modelo virtual propuesto se empieza de la misma manera, las resistencias tienen una potencia máxima de 57,64 kW.

Se debe recordar que las resistencias se encienden y se apagan en periodos de tiempo cuando la temperatura alcanza un máximo conocido por los operarios del taller. Si no se mantiene este control de temperatura interna del horno, se puede llegar a dañar por la dilatación térmica diferenciada de los elementos que lo componen. En el modelo se estableció un límite en donde se debe mantener la temperatura del horno interna en 800 °C para calentar la pieza en el transcurso de 8 horas.

Gráfico 4.2 Modelado de la temperatura de las resistencias del horno en condiciones actuales de funcionamiento



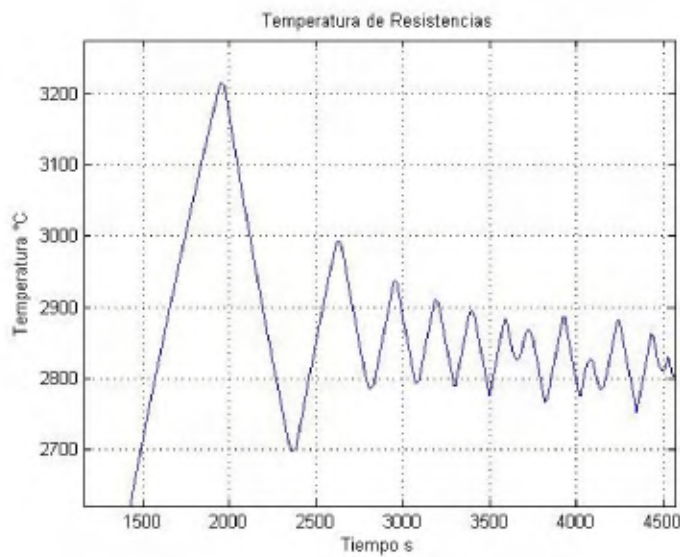
Fuente: Los Autores, 2013.

En el gráfico 4.2 se evidencia como las resistencias necesitan una potencia muy elevada para mantener el recinto interno del horno a 800 °C; se inicia el calentamiento de una forma acelerada llevando a las resistencias a llegar a un máximo cercano a los 3200 °C en aproximadamente media hora, y luego por pérdidas de calor y la limitación de temperatura interna establecida las resistencias al ser apagadas empiezan a bajar su temperatura. Después de esto entran en ciclos de apagado y encendido el tiempo necesario para mantener el interior del horno a la temperatura establecida.

Cabe destacar que la oscilación presente a lo largo del gráfico es suave y no abrupta como parece ser en la escala del gráfico 4.2. Esto es importante de señalar dado que podría confundirse con inestabilidades numéricas del método de solución. En una ampliación de la imagen, resulta evidente que la resolución de la solución es considerablemente menor al período de oscilación de la

temperatura y que no hay discontinuidades en la derivada de la solución, lo que descarta el origen numérico de las oscilaciones.

Gráfico 4.3 Detalle del gráfico de temperatura pico de las resistencias del horno en condiciones actuales de funcionamiento



Fuente: Los

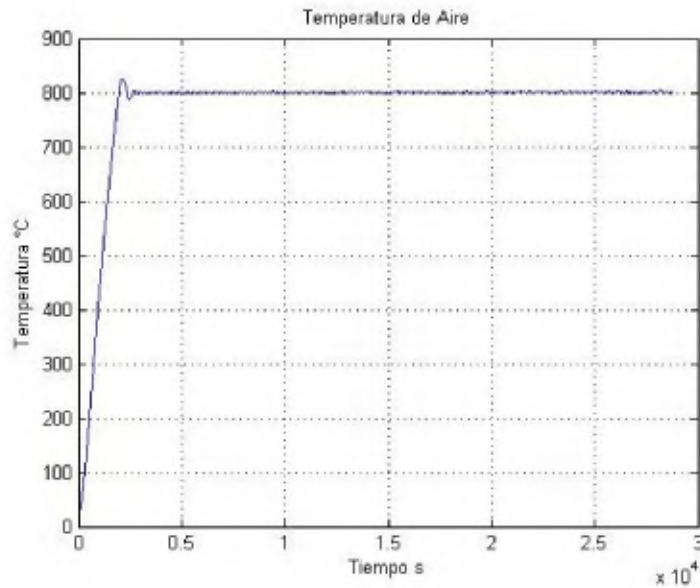
Autores, 2013.

En el
muestra
de
las
presentado
oscilaciones
mientras se
apagan,
como el

gráfico 4.3 se
cómo el cambio
temperatura de
resistencias es
como
suavizadas
encienden y se
cabe destacar
comportamiento

de las resistencias muestran claramente el enfriamiento newtoniano el cual cita a aquel proceso de enfriamiento que sigue una ley determinada experimentalmente por Isaac Newton, según la cual la velocidad de enfriamiento de un cuerpo cálido en un ambiente más frío, es proporcional a la diferencia entre la temperatura instantánea del cuerpo y la del ambiente.

Gráfico 4.4 Modelado de la temperatura del aire interno del horno en condiciones actuales de funcionamiento



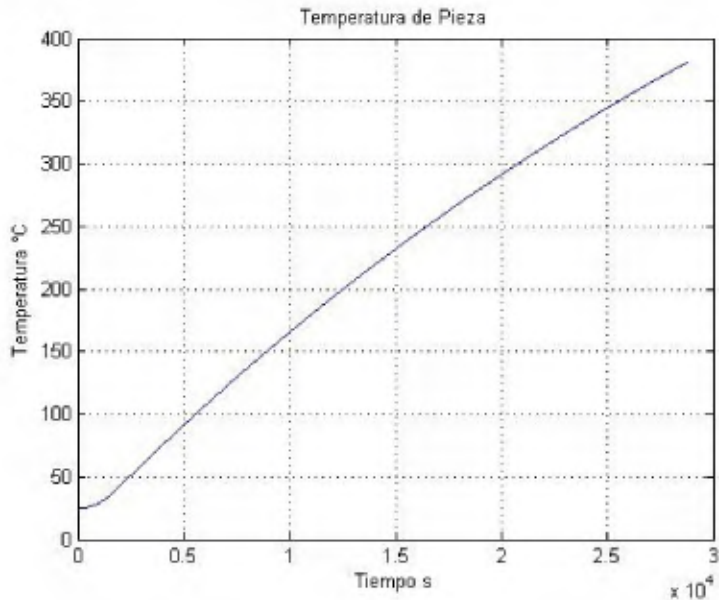
Fuente: Los Autores, 2013.

La temperatura interna del horno se mantiene a 800 °C, como se establece en la simulación, y se puede notar como aumenta un poco al inicio del proceso y luego, por pérdidas de calor y el control de las resistencias, la temperatura baja tendiendo a una cierta estabilidad. Este control de temperatura del ambiente interno es equivalente al programa de limitación que se aplica en el taller de tratamiento térmico.

Por consiguiente, ésta atmósfera interna debe proporcionar el calor necesario y así elevar la temperatura de la pieza lo suficiente para cumplir con las expectativas de la temperatura del tratamiento térmico aplicado.

Es importante destacar que esta temperatura interna es la causa principal del calentamiento de la pieza, pero también suple las pérdidas de calor por las paredes, piso y puerta, entre otros.

Gráfico 4.5 Modelado de la temperatura de la pieza en calentamiento en condiciones actuales de funcionamiento

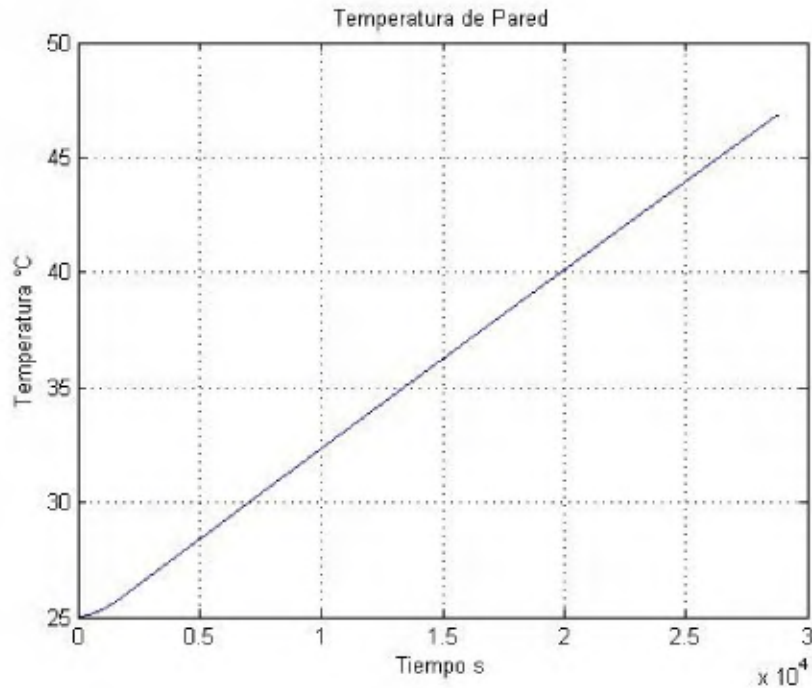


Fuente: Los Autores, 2013.

En el gráfico 4.5 se puede notar como la pieza se calienta regularmente hasta unos 380°C, situación que refleja como de 800 °C de temperatura del aire interior; la pieza solamente logra calentarse más de 400°C por debajo del interior del horno. Esto se debe principalmente al valor del coeficiente de convección en la superficie de la pieza y al tiempo que se requiere para calentarla. Es evidente que la pieza no logra uniformar su temperatura interna, situación que podría mejorar si no hubiera tantas pérdidas ya que reducen la temperatura ambiente interior.

De la misma forma que el aire interno calienta la pieza, las paredes reciben calor de esta fuente y por lo tanto también se calientan, lo que constituye las pérdidas de calor al exterior. Lo ideal es reducir este valor para ahorrar energía o bien aprovecharla para lograr una temperatura de proceso más alta.

Gráfico 4.6 Modelado de la temperatura de pared del horno en calentamiento en condiciones actuales de funcionamiento

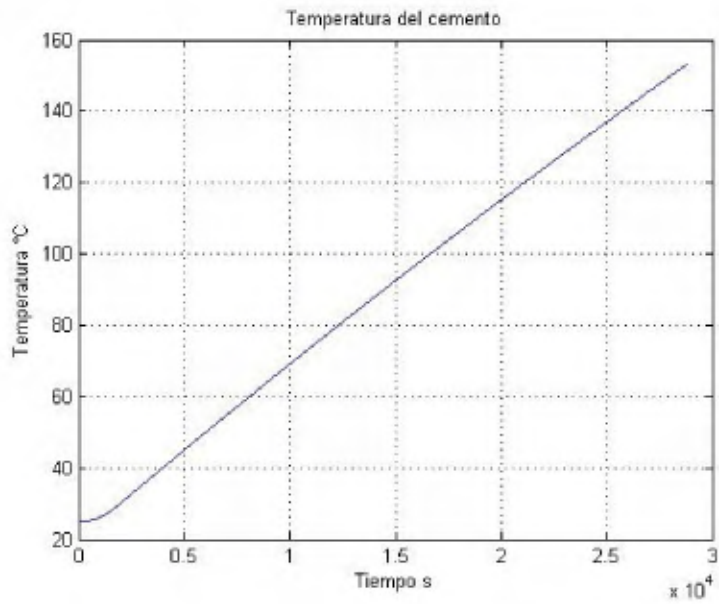


Fuente: Los Autores, 2013

Como se puede apreciar en el gráfico 4.6 la pared se va calentando, absorbiendo energía del aire caliente interno siguiendo una tendencia lineal. El punto medio de la pared se encuentra a una temperatura de 48 °C aproximadamente luego de ocho horas de trabajo, lo cual indica que si se relaciona la temperatura de la pared con el calor requerido para lograr llegar a esta temperatura de 48 °C, se puede destacar que las paredes no han absorbido mucho calor del aire, lo que representa una gran resistencia al calentamiento y, por lo tanto, las pérdidas adjudicadas a una transferencia de calor del aire interno hacia las paredes no es crítica. En otras palabras, el aire interno caliente no está cediendo mucha energía a las paredes. Esta situación de igual forma no es indiferente y se puede mejorar para que las pérdidas sean aún menores y se pueda generar una mejor atmósfera interna para que la pieza pueda recibir más calor por parte del aire interior.

Por último, se generan los resultados del modelado de la temperatura de la parte inferior del horno, la cual no tiene ningún tipo de aislante y está en contacto directo con el suelo de cemento del recinto. Primero se hizo un análisis a una distancia de 250 mm (10 in) bajo el nivel del piso para ver a qué temperatura llegaba esa zona y el resultado obtenido fue el siguiente:

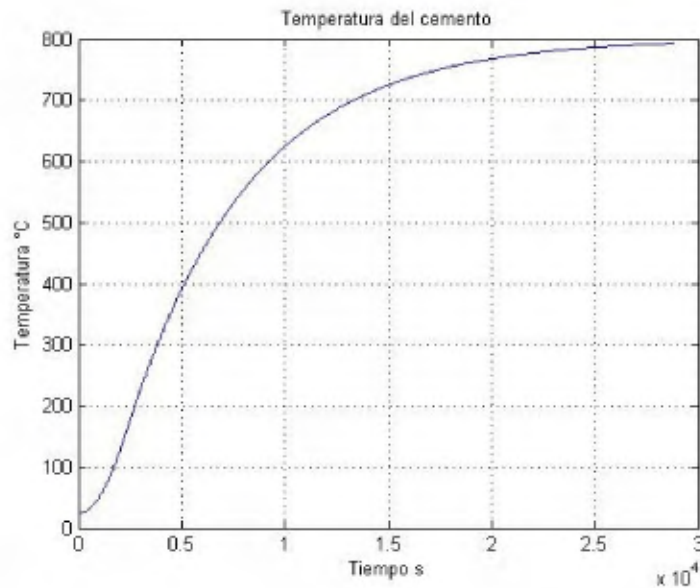
Gráfico 4.7 Modelado de la temperatura del concreto a 250 mm por debajo del suelo en condiciones actuales de funcionamiento



Fuente: Los Autores, 2013.

Tal como se puede apreciar en el gráfico 4.7, el concreto en ese punto alcanza una temperatura de unos 150 °C, debido a que en esta sección no hay aislante. Haciendo un análisis en esta unidad y enfocándolo al punto de contacto entre el horno y el cemento inferior, se tiene una temperatura mucho mayor, cuyo el resultado es el siguiente:

Gráfico 4.8 Modelado de la temperatura del concreto inferior en contacto directo el horno en condiciones actuales de funcionamiento



Fuente: Los Autores, 2013

En este caso se puede apreciar como el acero inoxidable interno del horno ofrece cierta resistencia ante el calor que está presente, pero definitivamente insuficiente. Por consiguiente, el piso de concreto donde se apoya el horno se calienta conforme pasa el tiempo, hasta prácticamente igualar la temperatura del aire interno circundante del horno.

Las pérdidas de calor en este punto son sustancialmente mayores, ya que el piso está calentándose con energía que debería destinarse a calentar la pieza. Además, hay que considerar que este espacio se encuentran los rodamientos para deslizar la bandeja de materiales, los que se dilatan debido al calor y se desgastan mucho más rápido de lo previsto que si operaran a temperaturas menores.

4.6 Eficiencia estimada en la condición actual.

Para el cálculo de eficiencia del horno se establecen dos parámetros de estudio, la resistencia del horno ante la temperatura y la cantidad de energía aprovechada por la pieza en el calentamiento, por lo tanto, para iniciar con el proceso de cálculo se establecen las condiciones actuales del horno.

Se debe tomar en cuenta que, para los hornos en estado estable, cuando se habla de eficiencia no se pretende hablar de un sistema plenamente eficiente, ya que, por su naturaleza, la forma de trabajar de un horno es entregando toda la energía generada por la fuente de calor hacia otros elementos

para aumentar su temperatura. Por tanto, toda la energía se gasta en pérdidas, y estas pérdidas son reflejadas en elementos que se calientan, los cuales son: las paredes, la pieza a calentar, el aire interno, la puerta, entre otros. De esta forma, al hablar de eficiencia, se hace alusión a mejorar las condiciones del horno específicamente en lo que respecta a mantener la temperatura de aire interno, con el fin de calentar uno de los elementos mencionados que, en este caso, se trata de la pieza a la cual se le requiere realizar tratamiento térmico.

En otras palabras, la eficiencia de un horno en estado estable es nula dado que pierde todo lo que consume, pero se puede cuantificar su eficiencia al analizar los elementos físicos en cuanto a su resistencia térmica y a la energía que estos proporcionan y la capacidad del horno de calentar la pieza, que sería la energía aprovechada por la pieza para subir su temperatura. Este es el indicador de eficiencia que se usará en este trabajo.

Realizando un análisis inicial de resistividad, se conoce que el horno sufrió cambios estructurales muy evidentes para poder aumentar su eficiencia, la forma de calcular este valor numérico se realiza por medio de la resistencia del horno ante el flujo de calor, en otras palabras, la pérdida de energía en la condición actual ante la pérdida de energía en la condición de diseño propuesta.

$$Eficiencia = \frac{(R_{propuesta} - R_{actual})}{R_{actual}} \cdot 100 \quad (69)$$

De esta manera, se puede estimar qué tan efectivo es el horno por medio de la resistencia que posee, elemento que representa la capacidad del horno de mantener el calor en su interior. Para la condición actual se contempla la resistencia de conducción y de convección total de las paredes, el piso y el techo del horno. Estas constantes se encuentran explícitamente indicadas en las tablas de resistencias térmicas de las ecuaciones, que se denominaron en la sección 4.3:

- Resistencia Térmica 1, R1 (Cuadro 4.8) que simboliza la resistencia que presentan las paredes y techo del horno ante la temperatura del ambiente externo.
- Resistencia Térmica 2, R2 (Cuadro 4.9) la cual representa la resistencia térmica que presentan las paredes y techo ante la temperatura interior del horno.
- Resistencia térmica 5, R5 (Cuadro 4.12) cuya representación sería la resistencia térmica del concreto inferior del horno con respecto a la temperatura interna del mismo.

El método empleado para realizar una equivalencia en las resistencias térmicas es la sumatoria de resistencias en paralelo. Esta representación se puede apreciar en la ilustración 4.21.

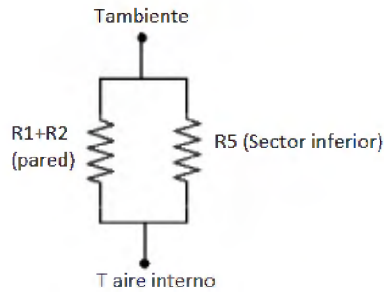


Ilustración 4.44 Representación gráfica de la equivalencia de resistencias térmicas para obtener la eficiencia térmica del sistema

Fuente: Los Autores, 2013.

Cómo se observa en la ilustración 4.21, el calor concentrado en el aire interno busca ceder este calor al aire ambiente. Los únicos elementos que se resisten a esta transferencia son las paredes (laterales, techo y puerta) y el piso (sector inferior). Se utiliza esta configuración ya que de esta forma se obtiene una resistencia térmica común, que puede ser evaluada contra la resistencia térmica que propone el nuevo diseño. Por lo tanto, empleando la equivalencia en paralelo se muestran los resultados en el cuadro 4.14:

Cuadro 4.20 Equivalencia de resistencias térmicas en condiciones actuales.

Equivalencia de resistencias del horno actual								
Variabl e	R1	R2	R5	1/ (R1+R2)	1/R5	R _{total}	1/R _{total}	Unidade s
Valor	2,1 6	2,1 2	0,0 7	0,23	13,4 0	13,6 4	0,07	K/W

Fuente: Los Autores, 2013

Con este dato de resistencia actual, se puede realizar el mismo cálculo para obtener de la resistividad del horno luego de aplicar la propuesta de diseño y de esta manera comprar ambos resultados.

Además del valor de resistencia que tiene el horno, cada elemento del mismo requiere cierta cantidad de energía para poder subir su temperatura, esta energía es una pérdida de calor que suministran las resistencias de calentamiento. Para el caso en estudio, la energía que es consumida por la pieza es la que importa ya que es la encargada de aumentar la temperatura de la misma. Se realizará un estudio de energía para determinar cuanta energía requiere cada elemento para alcanzar la temperatura final del proceso de trabajo del horno, y de esta manera se puede analizar la energía de la pieza.

Inicialmente se realizan cuadros de datos (cuadro 4.15) donde se muestran valores del sistema actual.

Cuadro 4.21 Datos de temperatura y energía de elementos en el sistema actual.

Condición Actual					
Elemento	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Δ Temp (°C)	m·c_p (J/K)	m·c_p·ΔT (kJ)
Piso	25	300	275	165.100	45.403
Paredes y techo	25	47	22	124.872	2.747
Pieza	25	380	355	1.150.000	408.250
Exfiltraciones	25	25	0	4.493	4.493
Aire	25	800	775	15.099	11.702

Fuente: Los Autores, 2013

Luego de ocho horas de trabajo dentro del horno, tomando como base la configuración actual, se pueden obtener los datos de temperatura para cada uno de los elementos del sistema y, junto con los valores de calor específico de cada material y su masa, se pueden realizar los cálculos de energía respectivos, los cuales se pueden apreciar mejor en el cuadro 4.16, cabe resaltar, que la energía que se pierde en las varillas es cero debido a que no hay refractario en el horno en estos momentos, y la energía obtenida por las exfiltraciones se obtuvo en la sección 4.4 luego de aplicarle el tiempo de trabajo (8 horas) y la conversión de unidades respectiva.

Cuadro 4.22 Energía consumida por cada elemento para aumentar su temperatura

Elemento	Horno condición actual (kJ)(m·c_p·ΔT)
Pared este	2.747
Pared sur	2.747
Pared oeste	2.747
Puerta	2.747
Piso	45.403
Techo	2.747
Exfiltraciones	4.493
Pérdidas por varillas	0
Calentamiento pieza	408.250
Otros... (Aire)	11.702

Fuente: Los Autores, 2013

Basados en los datos del cuadro 4.16, se puede notar como la energía que consume el piso es elevada comparada con la equivalente de otros elementos, pudiéndose considerar como una fuente potencial de calor desperdiciada, en otras palabras, aumentar la resistencia térmica en ese sector sería ideal para que la energía no se consuma por este elemento. Asimismo, se observa como la energía consumida por la pieza también representa un valor elevado y es el que, para propósitos del

proyecto, tiene la mayor relevancia; puede notarse que la energía escapa por el piso del horno principalmente, y es también la zona más difícil de aislar.

En cuanto a la energía que consume el aire al calentarse, esta es claramente alta con respecto a otros elementos, ya que el factor que eleva este valor es la temperatura que pasa de 25°C a 800°C, por lo que para casos de aprovechamiento de energía y consumo no es relevante.

Con estos datos de energía y resistividad se analizarán los mismos términos para la condición de diseño propuesta y se compararán los resultados obtenidos en la sección correspondiente más adelante.

4.7 Movilidad de la bandeja que transporta las piezas dentro del horno

La bandeja sobre la que se colocan las piezas se desliza en cojinetes de contacto directo, en lugar de rodamientos, y no se utilizan lubricantes por la temperatura que alcanza durante el transcurso de la operación del horno.

En el caso de los cojinetes y rieles del horno, el material del que están fabricados es Acero 4140 cuya composición aproximada de Cromo es de 0,80% - 1,10%, y el Níquel no está presente en la aleación, lo que es un elemento indispensable en las aleaciones utilizadas para altas temperaturas. Esto genera problemas con la movilidad de la bandeja. La exposición a las temperaturas de operación del horno provoca deterioro en los cojinetes.

Experimentalmente todas las sustancias, con excepciones como el agua, antimonio o bismuto, se dilatan al aumentar la temperatura. La dilatación es normalmente pequeña en términos relativos, por ejemplo, en sólidos es del orden de $10^{-4} - 10^{-3}$. Sin embargo, no se trata de un fenómeno cuya repercusión sea despreciable, y específicamente en este caso debe tomarse en cuenta.

Para medir la expansión térmica de un determinado objeto se utiliza el coeficiente de expansión térmica α , el cual es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un sólido o fluido experimenta un cambio de temperatura. Este valor varía dependiendo del material y para propósitos de comparaciones, se mencionan en el cuadro 4.18 valores del coeficiente de expansión lineal α para distintos materiales.

Cuadro 4.23 Coeficientes de expansión lineal

Sustancia	α ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Vidrio Pyrex ®	3
Madera, en dirección paralela a las fibras	2-9
Granito	8
Vidrio ordinario	9
Ladrillo	9
Hierro	11,6
Acero	11-12

Fuente: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

Los rodamientos de la bandeja están en contacto directo con la atmósfera del horno, se exponen a los cambios de temperatura que sufre la pieza tratada y este hecho, aunado al material del que están hechos los rodamientos (acero 4140), contribuyen a una dilatación térmica que trae como consecuencia una dificultad en su movimiento. Si existiera algún aislamiento que protegiera los rodamientos de las temperaturas elevadas del horno, este problema se solucionaría y la movilidad de la bandeja sería más fácil.

5 Propuesta de diseño

5.1 Configuración física

Luego de hacer el análisis de las condiciones actuales del horno, se presenta la necesidad de mejorar la eficiencia energética del mismo, manteniendo sus características primordiales, que se resumen en los siguientes aspectos:

- Se deberá poder elegir la tasa de elevación de temperatura, de manera que se mantenga entre límites preestablecidos con un sistema de regulación automática.
- Se deberá controlar con precisión y velocidad de respuesta suficiente la temperatura de la atmósfera en contacto con la pieza que se trata en el horno.
- Su instalación debe adecuarse a la acometida eléctrica y al espacio reducido del que dispone el taller Anonos para tal efecto.

Para poder conseguir estos resultados, se mantuvo la idea de que el horno produjera calor al circular la corriente eléctrica por resistencias de aleación níquel-cromo alojadas y mediante convección forzada generar una atmósfera estable, con la diferencia del diseño anterior, que el nuevo diseño se diseñó con resistencias en tres de las paredes internas del horno y siempre manteniendo el conjunto de resistencias ubicadas en el techo del mismo.

Para que las resistencias no tengan que ser de muy alta potencia, para evitar costos de operación innecesariamente altos, la selección del nuevo conjunto de resistencias se complementará con una selección correcta del juego de materiales para aislar las paredes puerta y techo del horno.

5.2 Aislamiento con ladrillos moldeados

En la sección 3.6 se explicó la importancia de colocar material aislante y refractario en un horno para evitar la pérdida de calor y así conservar la temperatura interna en el hogar.

Se propone en este caso el uso de ladrillos de denominación comercial *ThermalCeramics* tipo K. Una de las propiedades más importantes y únicas de este material es su baja densidad, dado que tienen un alto porcentaje de burbujas de aire. Como resultado, conducen menos calor que los otros aislantes más pesados. Además los compuestos con los que estos ladrillos están hechos son de gran ayuda para mejorar la termodinámica dentro del horno.

Las propiedades de los ladrillos refractarios aislantes tipo K se resumen en los cuadros 5.1 y 5.2, y su aspecto físico en la ilustración 5.1.



Ilustración 5.45 Ladrillo refractario *ThermalCeramics* tipo K.

Fuente: Los Autores, 2013

Cuadro 5.24 Análisis químico de los ladrillos moldeados tipo K.

Análisis Químico , % (ASTM C 573-70)		
Alúmina	Al ₂ O ₃	39
Sílice	SiO ₂	44
Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	0,4
Óxido de titanio	TiO ₂	1,5
Óxido de Calcio	CaO	15,4
Óxido de Magnesio	MgO	0,1
Álcalis, como	Na ₂ O	0,3

Fuente: Thermal Ceramic, 2009

Cuadro 5.25 Características de los ladrillos TIPO K.

Ladrillo Aislante	Tipo K
Temperatura de Servicio (°C)	1100
Densidad promedio ASTM C 134-7	465 kg/m ³
Punto de Fusión (°C)	1510
Módulo de ruptura (kg/cm ²)	7,7
Resistencia en frío (kg/cm ²)	7,7
Conductividad térmica (W/mK)	
ASTM C 182-88 (°C)	
260	0,12
540	0,14
815	0,17
Calor específico (J/kg*K)	5,38

Fuente: Thermal Ceramic, 2009

Para aprovechar el potencial de ahorro energético y de disminución de temperaturas superficiales exteriores del horno, se consideraron los siguientes aspectos al disponer los ladrillos en la geometría del horno.

En la ilustración 5.2 se muestra detalladamente una unidad de ladrillo para construcción de techos. Se observan barras horizontales que atraviesan de lado a lado los ladrillos. Cabe destacar que estos se disponen de forma que, la cara con menor área superficial, sea la cara que tenga contacto con el techo del horno. Esto se debe a que mejora la resistencia mecánica de todo el conjunto de ladrillos en el techo dentro del horno.

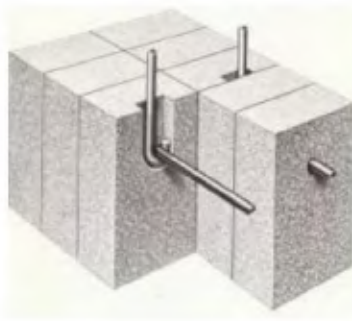


Ilustración 5.46 Configuración de una sección de ladrillos aislantes del techo del horno.

Fuente: Thermal Ceramic, 2009

Para el caso de las paredes se requería una construcción que mantuviera mucha simplicidad y facilidad en la aplicación en las paredes ya existentes. Para ello se utilizó el mismo principio que en el techo. Los ladrillos se disponen de forma que la cara con menor área superficial sea la cara que tenga contacto con las paredes ya existentes del horno.

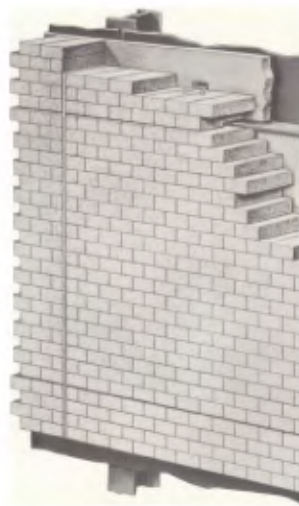


Ilustración 5.47 Configuración física de los ladrillos aislantes de las paredes del horno.

Fuente: Thermal Ceramic, 2009

En la ilustración 5.3, además, se muestra un método típico de anclar paredes de ladrillos aislantes. Este diseño de pared puede ser usado como una pared de soporte seccional, o como una pared alta sin soportes intermedios. Para este caso se decide insertarle barras verticales que atravesaran los ladrillos, se decide realizar este diseño debido a las altas temperaturas que sufre el horno; con este diseño se tiene presente movimientos normales de las paredes al sufrir expansiones térmicas. Además con este diseño se logra optimizar y aprovechar el material aislante. Es decir, se trata de utilizar la mayor cantidad de ladrillos sin realizarles ningún tipo de corte.

El resultado de todos estas consideraciones se tradujeron en el diseño propuesto del horno para tratamientos post soldadura. Se debe recalcar que se mantuvo el diseño de las paredes en cuanto que se eliminan los ángulos de 90° con el propósito de mejorar el flujo de calor dentro de la cavidad del horno. Se tiene previsto colocar resistencias en cada una de las paredes para que con ello se produjera uniformidad y mayor estabilidad termodinámica, además de introducir mayor potencia calorífica.

Las ilustraciones a continuación muestran el diseño propuesto en cuanto al aspecto físico del horno.

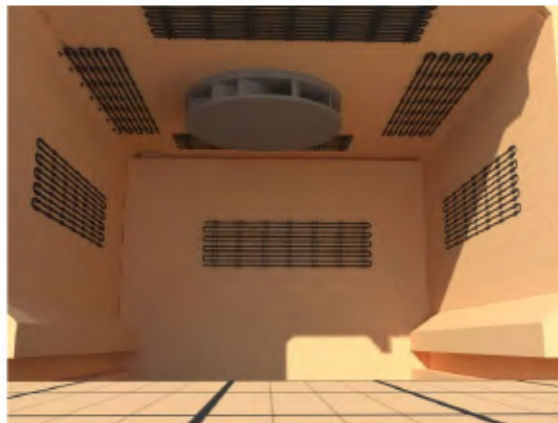


Ilustración 5.48 Vista frontal del hogar, configuración propuesta.

Fuente: Los Autores, 2013

En la ilustración 5.4 se observa la configuración de los ladrillos aislantes refractarios, la configuración de las resistencias y el diseño del canal de movilización de la bandeja del horno. Se decide ampliar la cantidad de resistencias y la ubicación de las mismas. Se decide poner resistencias en las paredes del horno con el fin de aumentar la potencia eléctrica y mejorar el flujo de calor hacia la pieza que se está tratando.

En la ilustración 5.5 se observa la forma como se introduce la bandeja en el canal de movilización del horno. El propósito de este canal es generar el mayor aislamiento entre hogar del horno y el

sistema de movilización de la bandeja. Este aislamiento lo que busca es prevenir al máximo el deterioro de los elementos del sistema de movilización de la bandeja.



Ilustración 5.49 Vista del hogar y bandeja con los ladrillos moldeados instalados
Fuente: Los Autores, 2013.



Ilustración 5.50 Vista del diseño de la bandeja transportadora de piezas.
Fuente: Los Autores, 2013.

Por último, ilustración 5.7 se muestra una vista superior del horno, se puede observar los rieles de movilización y su ubicación espacial en el área destinada para horno. Este horno no necesita mayor área que la actual y no hay previstas ampliaciones a mediano plazo.



Ilustración 5.51 Vista exterior de la configuración propuesta del horno.
Fuente: Los Autores, 2013.

5.3 Configuración de las resistencias

La fuente de energía es energía eléctrica que supe una serie de resistencias eléctricas dispuestas en configuración delta. Las fotografías de éstas y el esquema de la configuración se muestran en la ilustración 5.7



Ilustración
Configuración actual física de las resistencias
Fuente: Los Autores, 2013.

5.52

Se mantuvo la configuración eléctrica de las resistencias en la parte del techo y paredes. La configuración es en delta y se muestra en la ilustración 5.9.

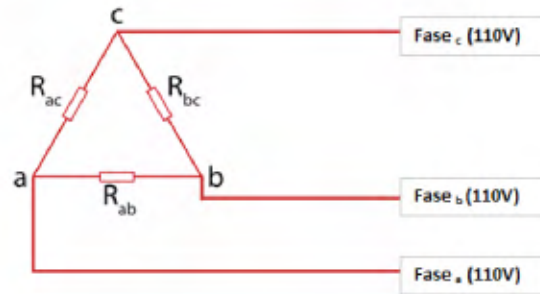


Ilustración 5.53

panel de resistencias
Fuente: Los Autores, 2013.

Configuración del

Además se conservó el ventilador axial que genera la convección forzada dentro del horno. Como se mostró anteriormente en la sección 4, se calculó la potencia eléctrica consumida por las resistencias que proveen la potencia térmica.

$$I_L = \sqrt[2]{3} \cdot I_f \quad (69)$$

$$I_f = 40 \text{ A}$$

$$\text{Potencia} = I_L \cdot V \quad (70)$$

$$\text{Potencia} = \sqrt[2]{3} \cdot I_f \cdot 208 \text{ V}$$

$$\text{Potencia de cada conjunto de resistencias} = \sqrt[2]{3} \cdot 40 \text{ A} \cdot 208 \text{ V}$$

$$\text{Potencia de cada conjunto de resistencias} = 14,41 \text{ kW}$$

Como el nuevo diseño cuenta con seis conjuntos de resistencias, entonces.

$$\text{Potencia total} = 14,41 \text{ kW} \cdot 6 = 86,46 \text{ kW}$$

5.4 Configuración del sistema de ventilación

En los hornos eléctricos de tratamientos térmicos de baja y media temperatura (hasta 750 °C), es frecuente realizar el calentamiento de la carga mediante una corriente de aire o atmósfera controlada a elevada temperatura, que cede calor a la carga por convección. El coeficiente de convección está directamente ligado con esta corriente de aire, puesto que depende fundamentalmente de la velocidad y la forma en que el fluido choca contra la pieza.

5.4.1 Disposiciones de la ventilación forzada.

Como se mencionó anteriormente la ventilación forzada que se diseña es de suma importancia, pues busca con esta ventilación disminuir la resistencia por convección en la pieza. Para ello hay que aumentar la turbulencia, disminuir la capa límite o aumentar la velocidad local del fluido en la superficie de la pieza. Se va a optar por aumentar la turbulencia del fluido (aire caliente en este caso) utilizando el mismo ventilador que posee el horno en la actualidad, pero la diferencia radica en redirigir el flujo de aire actual hacia la pieza que se encuentra en calentamiento. Se trata de lograr que el aire que circula en el interior del horno pase por las resistencias para que se caliente y posteriormente dirigirlo hacia la pieza mediante la interposición de deflectores y convectores.

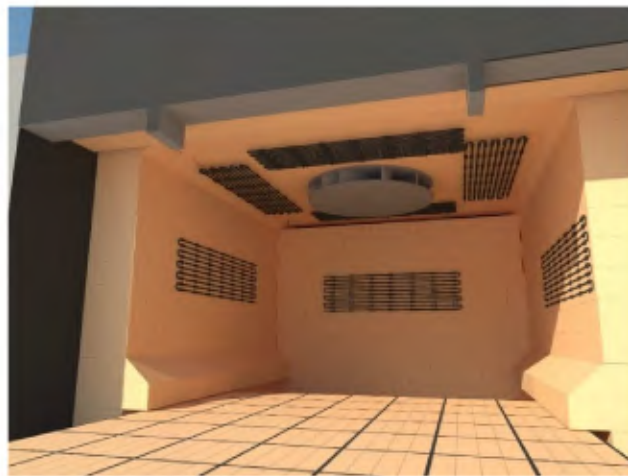


Ilustración 5.54 Motor-ventilador centrífugo
Fuente: Los Autores, 2013.

Los ventiladores utilizados en hornos se clasifican en dos tipos: centrífugos (de alabes rectos, curvados hacia adelante o curvados o rectos hacia atrás) y axiales. En la ilustración 5.10 se puede observar el motor-ventilador que es uno centrífugo curvo hacia atrás

Es importante que el reparto del caudal de aire sea uniforme dentro de la carga, lo que obliga a intentar disminuir la mayor cantidad de zonas muertas que den lugar a cortocircuitos de aire, así como no debe haber una excesiva densidad de la carga que impida el paso del aire por falta de presión adecuada en el ventilador. Además se busca que la mayor cantidad de aire pase por las resistencias y luego este choque contra la pieza.

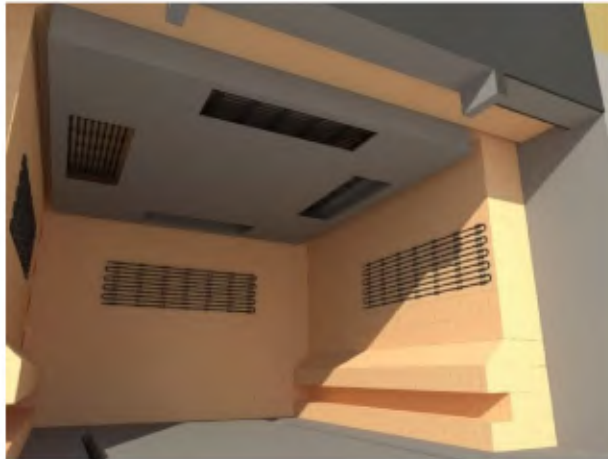


Ilustración 5.55 Diseño de motor-ventilador y deflector
Fuente: Los Autores, 2014.

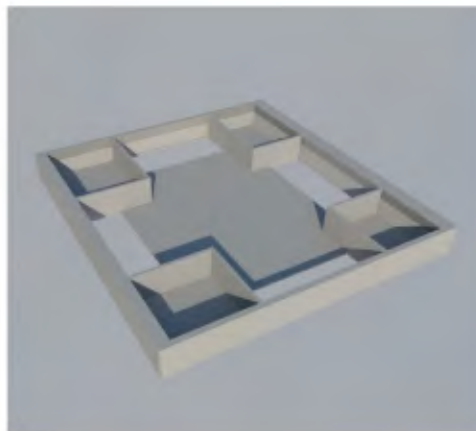


Ilustración 5.56 Diseño de deflector de aire
Fuente: Los Autores, 2013.

En el diseño del deflector, se busca direccionar la mayor cantidad de aire hacia las resistencias tratando de eliminar, como se mencionó anteriormente, la mayor cantidad de zonas muertas e intentando que la sea mínima la cantidad de aire que choque contra las paredes del deflector y con ello calentar las paredes del horno. La configuración del deflector mostrado logra esto, y con los agujeros justo por debajo de las resistencias logra generar que el aire salga del deflector justo hacia la localización de la pieza a tratar. Con este diseño se cuida el caudal de recirculación en la transmisión de calor por convección.

Se decide que el material para este deflector debe ser uno que sea resistente al calor y que tenga una buena resistencia mecánica. Para la construcción de este deflector se decide usar ladrillo refractario de alta resistencia *Morgan Thermal Ceramics* o similar.

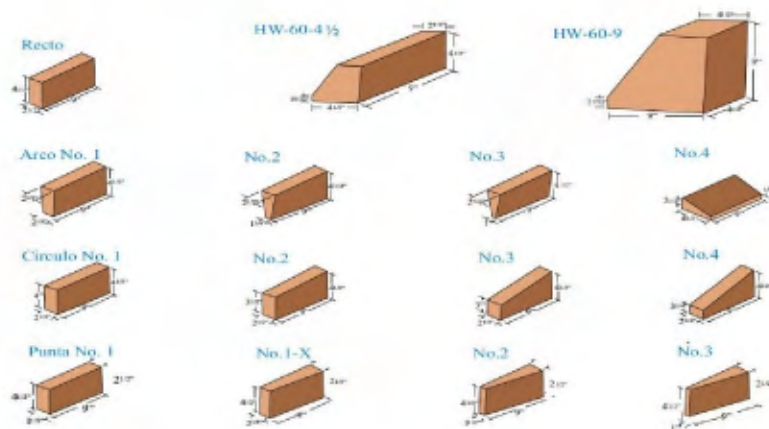


Ilustración 5. 12 Ladrillos refractarios de alta Resistencia mecánica
Fuente: Morgan Thermoceramics , 2009.

. En la ilustración 5.12 se puede observar diferentes tipos de perfil que se utilizarán en la elaboración del deflector según el diseño propuesto en la figura 5.12. Este deflector se utilizará perfiles rectos, de arco y circular tal y como se puede mostrar en la ilustración 5.12. Este ladrillo es de alta resistencia mecánica y soporta una temperatura de hasta 1040 °C. Además de esto, dicho deflector será sujetado por medio de pernos anclados a las paredes internas del horno. Estos pernos le brindará estabilidad al deflector y ofrece una opción sencilla de acceso en caso de sustitución del deflector o algún mantenimiento específico.

5.5 Pérdidas de calor por puentes térmicos

Las paredes refractarias de los hornos no suelen ser totalmente homogéneas, sino que contienen elementos metálicos o cerámicos cuyas características de aislamiento son diferentes, y crean caminos para las pérdidas de calor a través del material aislante y/o refractario. Cuando estos materiales con propiedades deficientes de aislamiento térmico, proveen una resistencia térmica muy pequeña entre el interior y el exterior de una pared o edificio. Por lo general su sección transversal es pequeña y se le denomina *puente térmico*, lo que naturalmente resulta en una pérdida considerable de calor a través de la superficie [CITATION Tip11 \l 1046].

Los puentes térmicos se clasifican en dos tipos:

- Elementos soldados o atornillados a la calderería exterior del horno (varillas metálicas de sujeción del aislamiento, chapas metálicas de soporte, entre otros).
- Elementos que atraviesan la pared y emergen en el exterior (como ejes de ventilador, tubos radiantes, ducto para termopar, entre otros).

Identificación de los puentes térmicos

Los puentes térmicos deben tomarse en cuenta si existe más de una posible trayectoria del flujo de calor a través de una superficie. En el caso de los ladrillos refractarios, esta capa de aislantes está compuesta por dos materiales diferentes, el ladrillo y las varillas de acero que los sujetan. Las varillas, que presenta propiedades de aislamiento muy pobres, provee un *corto circuito* a través del ladrillo e crea caminos para la pérdida de calor.

En la propuesta de diseño que incluye los ladrillos aislantes refractarios, el método de sujeción entre ellos se asemeja al de la Ilustración 5.13, con un tubo de metal que pasa entre los ladrillos. En este caso, al proponerse una instalación como la de la Ilustración 5.9, los ladrillos estarán unidos entre sí por una varilla de acero corrugado de un cuarto de pulgada (6,35 mm), constituyendo este elemento metálico una fuente de puente térmico; su conductividad térmica (42,7 W/m·K) difiere de la equivalente del ladrillo moldeado (0,17 W/m·K) lo que podría, como se mencionó anteriormente, aumentar las pérdidas de calor.

Para medir la cantidad de calor que se pierde como consecuencia de la presencia de puentes térmicos se utiliza el valor de *transmitancia térmica*, o también conocido como coeficiente de transmisión térmica U , que representa la cantidad de calor que atraviesa una superficie por unidad de área y por diferencia de temperatura.

Existe un procedimiento para calcular el coeficiente U , de acuerdo con la Norma ISO 6946:2007, que se usó para el caso en estudio, lo que se detalla a continuación.

En la ilustración 5.13 se muestra la composición de la pared.

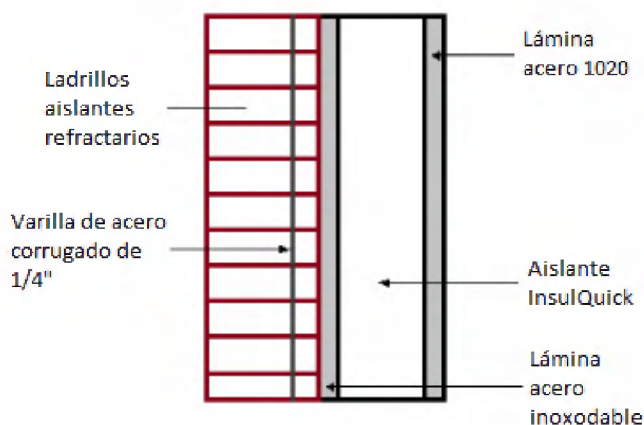


Ilustración 5.57

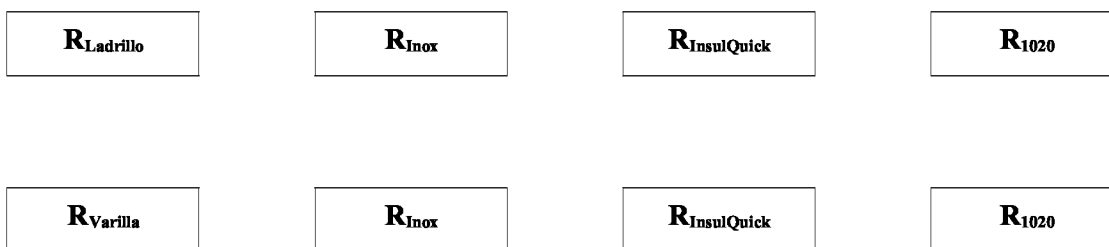
de pared del horno
Fuente: Los Autores, 2013.

Vista en corte lateral

5.5.1 Cálculo del límite superior de la resistencia, $R_{superior}$

Se calcula este valor combinando, en paralelo, el total de las resistencias de todos los posibles caminos que el flujo de calor pueda tomar a través de las paredes.

Elementos de resistencia – Dirección del flujo de calor (1)



Elementos de resistencia – Dirección del flujo de calor (2)

Ilustración 5.58 Flujos posibles de calor en la pared del horno
Fuente: Los Autores, 2013

Cuadro 5.26 Sumatoria resistencia térmica a través del material refractario (1).

Material	Conductividad (λ)	Espesor (d)	Resistencia (d/ λ)
	W/m·K	M	m ² ·K/W
Acero 1020 (lámina pared exterior)	50,0000	0,0032	0,0001
Aislante InsulQuick	0,0350	0,1270	3,6286
Acero inoxidable (lámina pared interior)	15,0000	0,0032	0,0002
Ladrillos aislantes refractarios	0,1700	0,2200	1,2941
Total (R_1)			4,9230

Fuente: ASM Handbook. (1992)

Cuadro 5.27 Sumatoria resistencia térmica a través del material refractario (2).

Material	Conductividad (λ)	Espesor (d)	Resistencia (d/ λ)
	W/m·K	M	m ² ·K/W
Acero 1020 (lámina pared exterior)	50,0000	0,0032	0,0001
Aislante InsulQuick	0,0350	0,1270	3,6286
Acero inoxidable (lámina pared interior)	15,0000	0,0032	0,0002
Varilla acero corrugado	42,7000	0,0064	0,0001
Total (R₂)			3,6290

Fuente: ASM Handbook. (1992)

El área transversal, donde se da la transferencia de calor de los ladrillos aislantes refractarios que componen la pared corresponde a 0,3806m², que es el producto de la altura del horno, 1,73 m por la longitud del ladrillo, 0,22m; en la ilustración 5.13 se observa la posición de los ladrillos en detalle.

Para el caso de las varillas que atraviesan los ladrillos, el área de transferencia de calor es menor, y representa una fracción de su equivalente de los ladrillos. Si se observa una varilla lateralmente, el área visible proyectada es un rectángulo, con el ancho equivalente al diámetro de la varilla (6,35 mm o ¼ de pulgada), y su largo correspondiente a la longitud de ella.

Considerando el diámetro de la varilla, y la altura del horno (1,73m), el área de transferencia de calor de las varillas corresponde entonces al producto de ambos valores, 0,0109 m², recordando que este valor es para una única varilla.

Tomando en cuenta que el área transversal de la varilla corrugada es diferente a la de los ladrillos moldeados, deben considerarse las fracciones referentes al área correspondientes a cada material para el cálculo de la resistencia total.

Considerando los valores de las áreas, 0,3806m² correspondiente a los ladrillos, y 0,0109 m² correspondiente a las varillas, se procede a obtener los valores fraccionales.

$$F_2 = \frac{0,0109}{0,3806} = 0,02(71)$$

$$F_1 = 1 - 0,02 = 0,98(72)$$

El área correspondiente a las varillas corrugadas representa un 0,02 (F₂) del total de la pared, y el área de los ladrillos corresponde entonces a un 0,98 (F₁) del total. Con estos valores, y los de los

cuadros 5.3 y 5.4 se procede a calcular el valor de $R_{superior}$ con la ecuación 73 [CITATION Tip11 \l 1046].

$$R_{superior} = \frac{1}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2}} \quad (73)$$

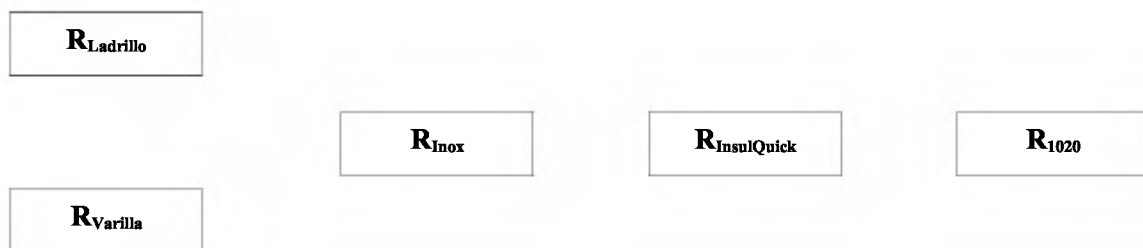
$$R_{superior} = \frac{1}{\frac{0,98}{4,9230} + \frac{0,02}{3,6290}}$$

$$R_{superior} = 4,889 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

5.5.2 Cálculo del límite inferior de la resistencia, $R_{inferior}$

Se realiza este cálculo combinando, en paralelo, las resistencias térmicas del flujo de calor de cada capa por separado y posteriormente sumando la resistencia de todas las capas a través de la construcción.

Ilustración 5.59 Flujo de calor para el cálculo de la resistencia inferior (R_{inf})



Fuente: Los autores, 2013.

Se procede a calcular la resistencia térmica de la capa de material que posee los puentes térmicos, ladrillos moldeados y varillas de acero corrugado

Cuadro 5.28 Resistencia térmica de la capa de material que posee los puentes térmicos

Material	Resistencia (d/λ) m ² ·K/W
Ladrillos aislantes refractarios	1,2941 (R ₃)

Varilla acero corrugado	0,0001 (R ₄)
-------------------------	--------------------------

Fuente: Los autores, 2013.

$$R_{pared\ c/\ puente} = \frac{1}{\frac{F_1}{R_3} + \frac{F_2}{R_4}} \quad (74)$$

$$R_{pared\ c/\ puente} = \frac{1}{\frac{0,98}{1,2941} + \frac{0,02}{0,0001}}$$

$$R_{pared\ c/\ puente} = 0,005 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Cuadro 5.29 Resistencia térmica total de los componentes del horno

Material	Conductividad (λ) W/m·K	Espesor (d) M	Resistencia (d/ λ) m ² ·K/W
Acero 1020 (lámina pared exterior)	50	0,003175	0,0001
Aislante InsulQuick	0,035	0,127	3,6286
Acero inoxidable (lámina pared interior)	15	0,03175	0,0002
Ladrillos + Varillas			0,005
Total			3,6339

Fuente: Los autores, 2013.

5.5.3 Cálculo de la resistencia térmica total R_{total}

$$R_{total} = \frac{R_{superior} + R_{inferior}}{2} \quad (75)$$

$$R_{total} = \frac{4,889 + 3,6339}{2}$$

$$R_{total} = 4,2618 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Con el valor de la resistencia térmica total se calcula el coeficiente de transmitancia térmica, siendo este el inverso del anterior, así:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$U = 0,234 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Por lo tanto, este valor insignificante de resistencia térmica que presentan las varillas de amarre de los ladrillos refractarios, no es introducido al sistema de ecuaciones.

El coeficiente de transmitancia térmica está expresado como un valor por metro cuadrado, dependiendo el número final del área de la superficie; tomando esto en consideración, es importante conocer cuánto es el calor absorbido solamente por las varillas, al ser ellas el elemento con menor resistencia al paso del calor y por el cual fue necesario recurrir a los cálculos de puentes térmicos.

Para conocer este dato se tomaron en cuenta la cantidad de varillas en cada pared, puerta y techo, siendo que cada una tiene la misma cantidad y se había mencionado previamente que son 25, y se multiplicó el área proyectada de una sola varilla por el total:

$$\text{Área}_{varilla} = 0,0109 m^2$$

$$\text{Área}_{varillas/pared} = 0,2725 m^2$$

$$\text{Área}_{varillas/pared, techo y puerta} = 1,3625 m^2$$

Considerando que la jornada de trabajo del horno es de ocho horas (28.800 segundos) y la diferencia de temperatura de 85 grados, es posible, junto con el coeficiente de transmitancia térmica, calcular la energía absorbida por las varillas de la siguiente manera:

$$Energía_{\text{lad}} = \left(0,234 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \cdot (28.800 s) \cdot (85 K) \cdot (1,3625 m^2) \quad (77)$$

$$Energía_{\text{lad}} = 780,4 kJ$$

5.6 Modelo matemático del horno con propuesta de diseño aplicada

Con el nuevo diseño propuesto, eliminando las aberturas que se encuentran situadas en techo y costado del horno y utilizando ladrillo refractario se llevan a cabo nuevas simulaciones con estas condiciones. Además, se integran las nuevas resistencias eléctricas para entregar más calor al aire interno sin fatigar las paredes del horno. El nuevo modelo de trabajo está asociado a las resistencias térmicas efectivas según se resumen desde el cuadro de propiedades 4.7 hasta el 4.12.

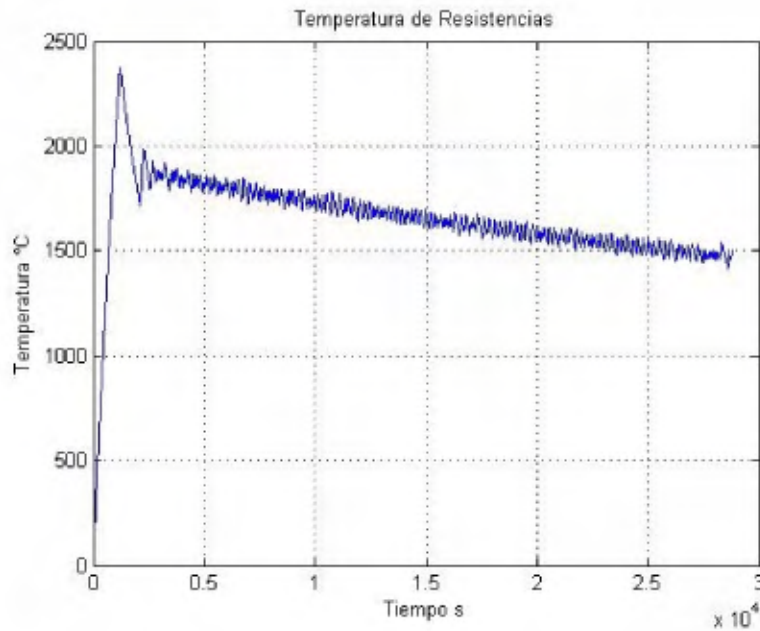
Cuadro 5.30 Ecuación de resistencia térmica de ladrillos refractarios

Resistencia térmica de ladrillos refractarios	
$R_{lad} = \frac{L_{lad}}{K_{lad} \cdot A_{lad}}$	(78)
R_{lad}	Resistencia por parte de los ladrillos refractarios, K/W
K_{lad}	Coefficiente de conductividad térmica del refractario, W/m·K
A_{lad}	Área transversal de los ladrillos refractarios, m ²
L_{lad}	Espesor de los ladrillos refractarios, m

Fuente: Los Autores, 2013.

Por lo tanto, integrando esta resistencia térmica a las ecuaciones del flujo de calor se obtienen los siguientes resultados:

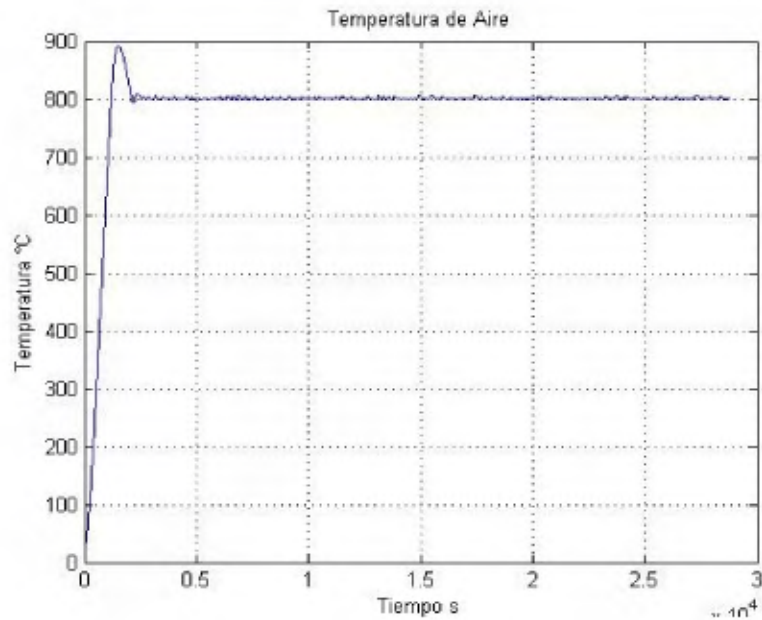
Gráfico 5.9 Modelado de la temperatura de las resistencias con los cambios aplicados.



Fuente: Los Autores, 2013.

Se puede observar como las resistencias presentan una mejor posición en cuanto al calentamiento necesario para poder mantener el horno estable en 800°C, lo cual es una gran mejoría. Se necesita mucho menos temperatura de entrega por parte de las resistencias para poder mantener estable el aire lo cual indica que las mismas se fatigan menos. Las resistencias no alcanzan temperaturas excesivamente altas, más bien se mantienen en 2000 °C aproximadamente con un pico de 2400°C. En comparación con el sistema actual, es una diferencia de casi 1000°C lo que es muy positivo para extender la vida útil de las resistencias. Se debe hacer referencia al hecho de que se introducen dos paneles de resistencias más lo que ayuda a que la mayor potencia se distribuya además de manera más uniforme. Sin embargo, este aumento implica que debe controlarse el sistema de operación de las resistencias de la misma manera que se ha llevado a cabo en el taller para controlar la los paneles actuales, de esta forma el resto de elementos del horno no presenten problemas por temperatura demasiado alta y por ende dilataciones no deseadas de paredes entre otros.

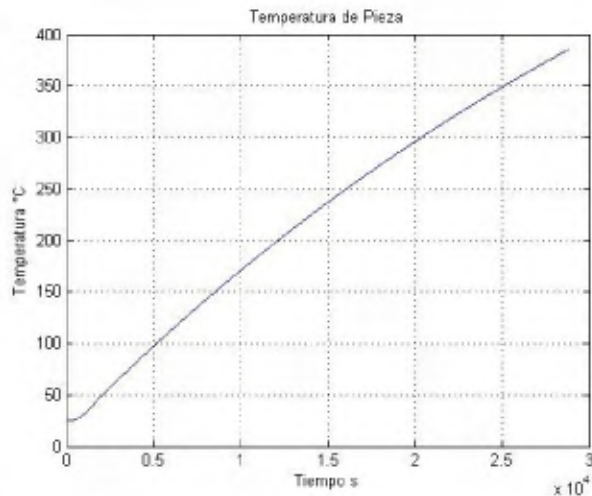
Gráfico 5.10 Modelado de la temperatura del aire con los cambios aplicados.



Fuente: Los autores, 2013

Se observa como el aire no presenta muchos cambios significativos en comparación a los datos mostrados en el gráfico 4.4 donde aún no se habían hecho cambios de diseño en el horno. Se debe destacar que el aire absorbe calor a una tasa establecida debido a sus especificaciones naturales y a las limitaciones que tiene el taller Anonos para controlar el calentamiento del mismo, por lo tanto el resultado es el esperado ya que no se han hecho cambios en cuanto a las propiedades del aire, a la masa del mismo o al sistema de funcionamiento del horno.

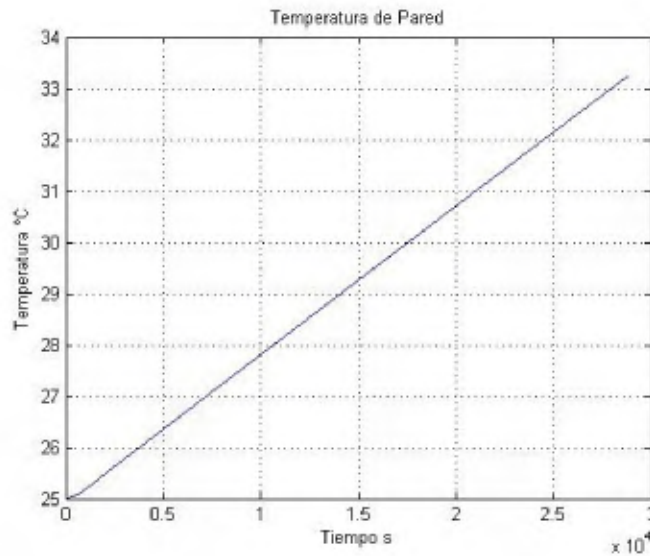
Gráfico 5.11 Modelado de la temperatura de la pieza con los cambios aplicados



Fuente: Los autores, 2013.

La pieza por su parte al tener condiciones exactamente iguales de conducción y especificaciones de material, densidad, calor específico, entre otros, muestra un comportamiento muy similar al modelo de la condición actual. Esto es una situación esperable en vista de que se regula la temperatura de operación en 800°C, de manera que en 8 horas alcanza condiciones muy parecidas a las del modelo anterior.

Gráfico 5.12 Modelado de la temperatura de las paredes del horno con los cambios aplicados.

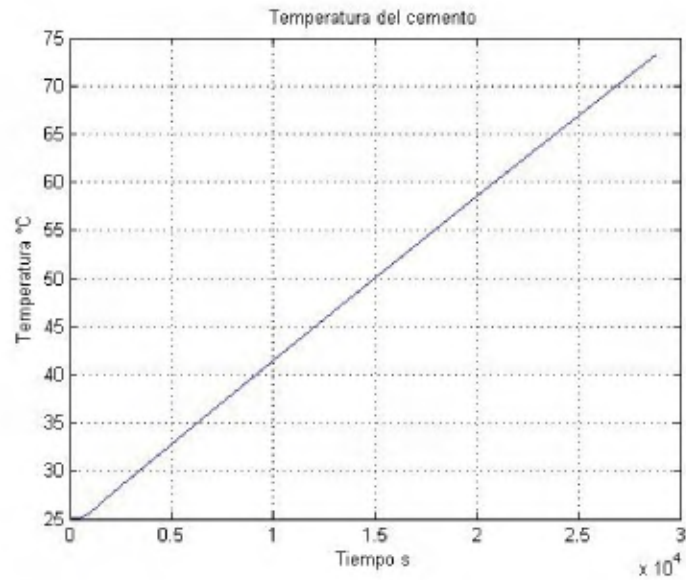


Fuente: Los autores, 2013.

Las paredes del horno, comparando con el gráfico 4.6, presentan un cambio sustancial en la temperatura superficial, anteriormente se tenía un valor aproximado de 48°C, y con la propuesta de diseño, para el mismo periodo de tiempo, este valor bajó a 33.5°C.

La disminución de la temperatura se debe principalmente a la implementación del ladrillo aislante refractario; el bajo coeficiente de conductividad térmica de los ladrillos es lo que permite que el calor no llegue en su totalidad a la pared.

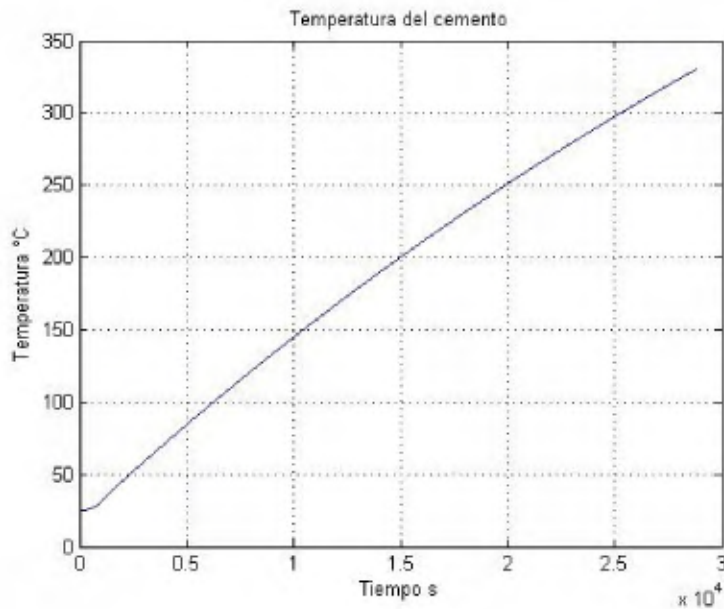
Gráfico 5.13 Temperatura del piso del horno con los cambios aplicados.



Fuente: Los Autores, 2013

El concreto que se encuentra como apoyo de la parte inferior del horno, presenta una clara disminución de temperatura, llegando a los 73 °C aproximadamente a 250 mm (10 in) bajo la superficie de contacto, con lo cual se reconoce una disminución alrededor de 77 °C, con respecto a la situación anterior. Este cambio es muy positivo y por tanto se decide analizar cuál es la temperatura que ronda la parte inferior del horno donde trabajan los cojinetes de rodamiento.

Gráfico 5.14 Modelado de la temperatura del concreto inferior en contacto con el horno con los cambios aplicados.



Fuente: Los Autores, 2013

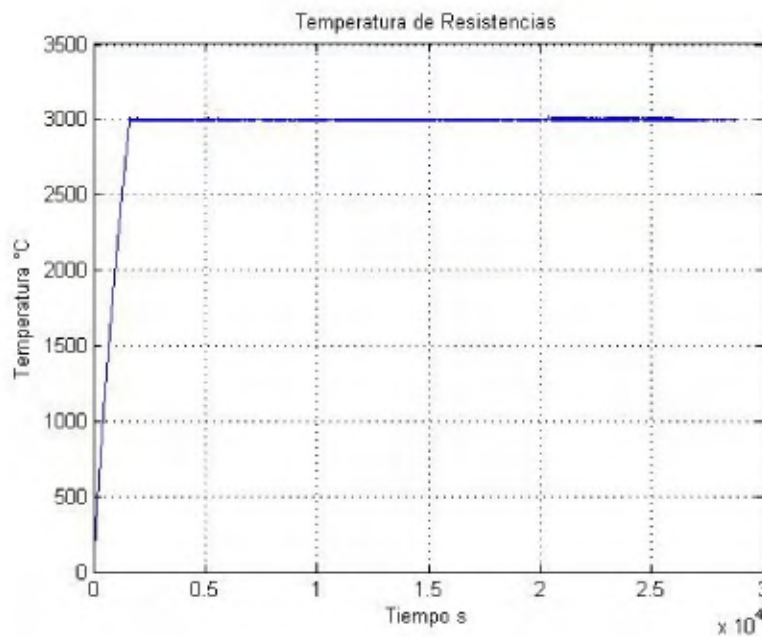
En el sector en que se encuentran los cojinetes, la temperatura llega a unos 300°C con esta configuración, en contraste con la actual, en que se aproximaba a 800°C. Esto es una mejora notable para las circunstancias de trabajo, considerando que hay una disminución de la temperatura en ese sector con lo cual proporciona confiabilidad para el trabajo de los cojinetes ya que éstos operan a una temperatura máxima de 350°C sin sufrir daño de funcionamiento. Se toma en cuenta que la bandeja del horno no se tendrá que mover en el momento en que el horno está operando a máxima temperatura. Por ende, la condición de que los cojinetes deban moverse a temperaturas inferiores a los 350°C se cumple tanto en lapsos de trabajo como en lapsos estacionarios de calentamiento, ya que la bandeja sólo se desplazará cuando el horno esté a una temperatura tal que pueda abrirse con menor riesgo laboral para los operarios.

Con esta configuración propuesta, se puede comprobar el comportamiento probable del horno usando el modelo para determinar las temperaturas que podría alcanzar si se ajustan los períodos de operación de las resistencias. También se pueden hacer pruebas con el modelo asumiendo diferentes potencias nominales de los bancos de resistencias, estas pruebas se muestran a continuación.

5.6.1 Modelo con resistencias eléctricas a temperatura invariable

En los siguientes gráficos se modelan escenarios de trabajo hipotéticos para evaluar la versatilidad del horno con las modificaciones sugeridas. El modelo asume que se controla la operación de las resistencias de manera que su temperatura se mantenga estable en un valor arbitrario pero no realista de 3000°C. Se supone este valor porque representa una condición excelente de análisis, sin embargo, en la práctica llevar las resistencias eléctricas a una temperatura de 3000°C no es viable debido a la limitante de los materiales que las componen. Por tanto, la situación pretende evaluar el sistema ante esta situación en cuanto a niveles de temperatura y resistencia del horno, reiterando que no es una opción realista, de igual forma, es sumamente aprovechable para analizar los demás componentes del horno y sus situaciones particulares ante tal temperatura.

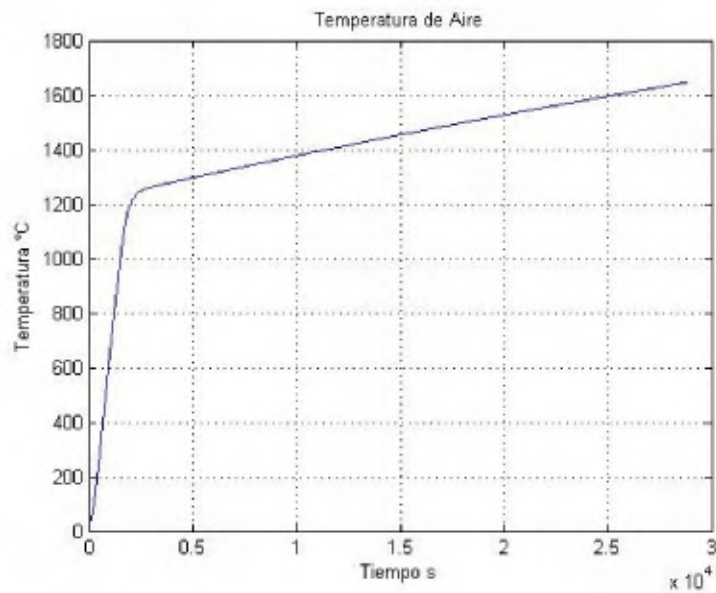
Gráfico 5.15 Temperatura de las resistencias en condición propuesta



Fuente: Los Autores, 2013.

Se presentan las resistencias del sistema estacionariamente ubicadas a una temperatura de 3000°C durante ocho horas para observar los resultados, los cuales son los siguientes:

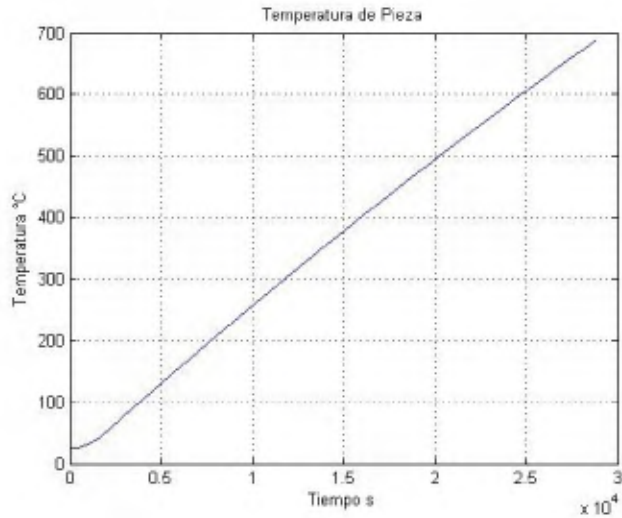
Gráfico 5.16 Modelo experimental para el nuevo diseño del horno. Temperatura del aire con condiciones de temperatura de resistencias constante.



Fuente: Los Autores, 2013.

El aire, como se puede apreciar, llega a valores muy altos (más de 1600°C). La diferencia de temperaturas es tan alta que la dilatación térmica diferenciada pondría en peligro la integridad del horno y, por ende, de los operadores.

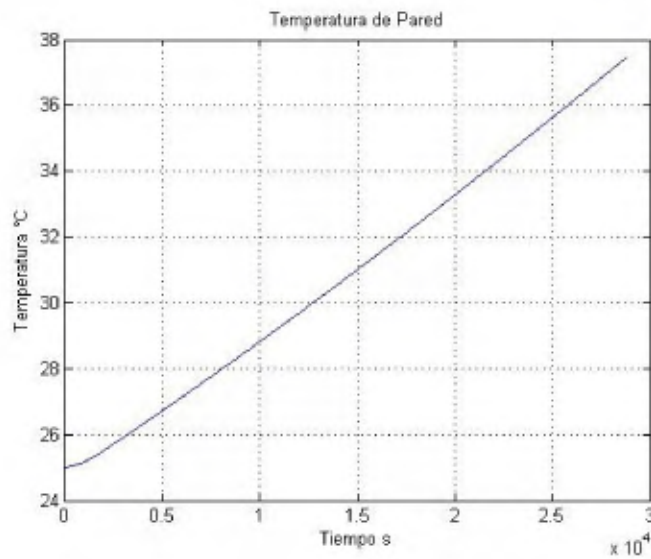
Gráfico 5.17 Modelo experimental para el nuevo diseño del horno. Temperatura de la pieza con condiciones de temperatura de resistencias constante.



Fuente: Los Autores, 2013.

Al aplicar esta configuración hipotética de prueba, donde las resistencias mantienen una inducción de calor más estable, y asumiendo que las resistencias llegan a una temperatura de 3000 °C con las demás condiciones exactamente iguales a las de la configuración de diseño propuesta para mejorar el horno, en un tiempo aproximado de ocho horas, una pieza de 2500 kg llega a temperaturas de casi 700°C.

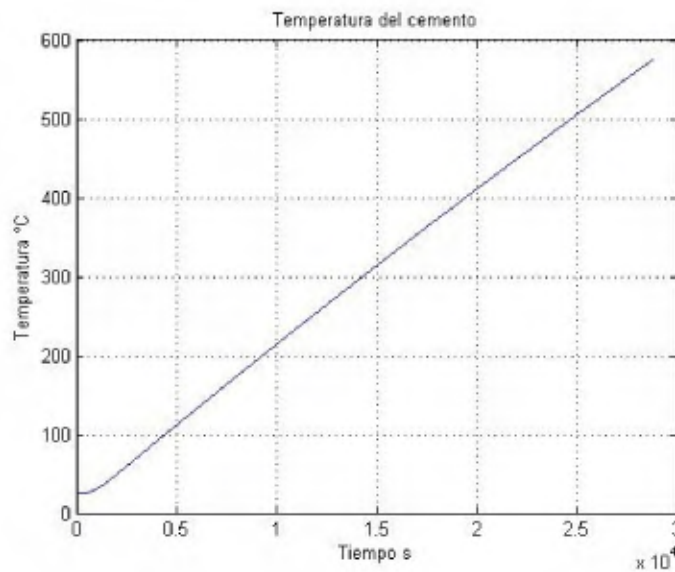
Gráfico 5.18 Modelo experimental para el nuevo diseño del horno. Temperatura de la pared con condiciones de temperatura de resistencias constante.



Fuente: Los Autores, 2013.

En cuanto a las paredes del horno, estas mantienen una temperatura aceptable de 37°C, dentro de los parámetros de trabajo usuales. El aislamiento refractario está cumpliendo con su propósito correctamente, tanto en términos de pérdidas como limitando la temperatura para evitar problemas estructurales por dilatación térmica diferenciada, se puede asegurar de esta forma que las paredes no sufrirán reincidencia de problemas por dilatación como los que se tienen actualmente, aun cuando se presente una temperatura tan elevada del aire interno el cual muestra un valor de 1650°C aproximadamente (gráfico 5.8).

Gráfico 5.19 Modelo experimental para el nuevo diseño del horno con condiciones temperatura de resistencias constante.



Fuente: Los Autores, 2013.

Por otra parte, la temperatura del fondo del horno donde los cojinetes trabajan presenta valores altos para los rodamientos (unos 550°C). Esta situación es un aceptable debido al valor elevado de temperatura que se supuso en el modelo experimental; debido a las condiciones actuales del horno, lo mejor que se pudo hacer para aislar este sector inferior fue la inclusión de refractario como fue

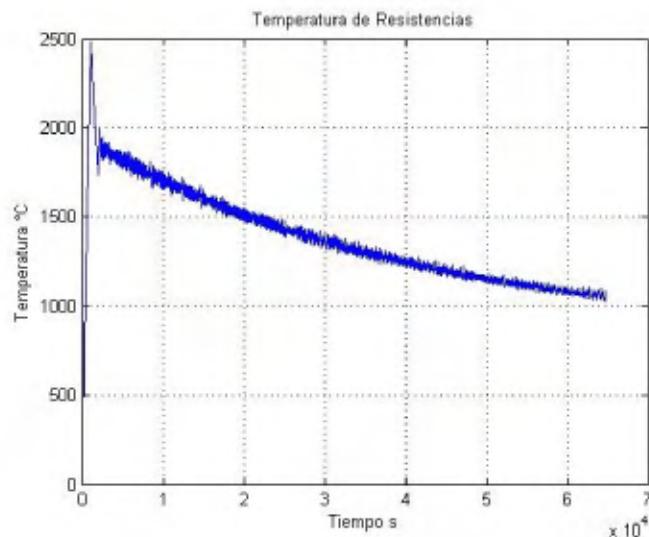
propuesto por el nuevo diseño. Sin embargo, es imposible retener la fluctuación de temperatura por completo para que no se caliente la zona. Al igual que en el caso anterior, parte de las atenuantes es que estos rodamientos sólo trabajarán cuando las temperaturas son suficientemente bajas como para que los operarios puedan trabajar cerca de la puerta abierta del horno, con lo cual esta situación no es un problema crítico de funcionamiento.

5.6.2 Modelo con atmósfera controlada a temperatura constante

En este modelado del sistema se suponen condiciones distintas sobre el funcionamiento del horno, las resistencias que emiten calor al medio presentarán una temperatura variable, gobernada por la temperatura del aire interno, esto significa que las resistencias oscilarán en distintos rangos de temperatura según sea necesario, para poder mantener una atmósfera de calentamiento uniforme en el ambiente interior, se propone establecer la temperatura interna a 800°C para que sea consistente con el modo de trabajo actual que se tiene en el taller Anonos.

De esta forma se puede realizar un modelado del sistema para observar cuanto tiempo necesita la pieza para alcanzar una temperatura establecida de 600°C y, de esta manera, analizar la posibilidad de realizar el trabajo de tratamiento térmico sobre la pieza bajo estas condiciones. Al realizar el modelado del sistema se tiene lo siguiente:

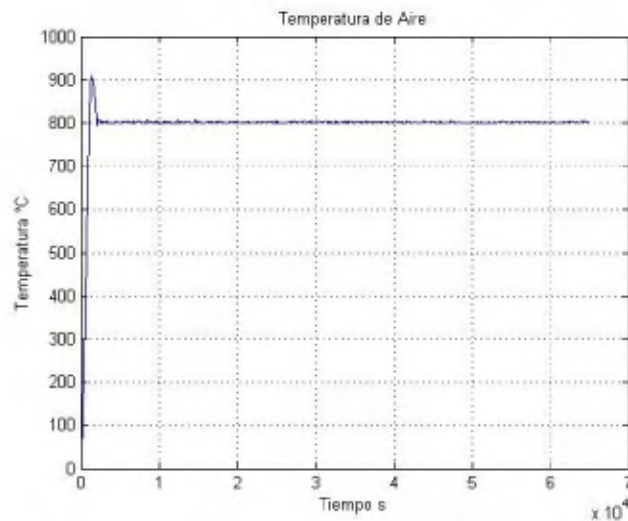
Gráfico 5.20 Modelado de situación experimental. Temperatura de resistencias en condiciones de temperatura constante del aire.



Fuente: Los Autores, 2013.

Según los resultados del gráfico 5.12, se observa que a las resistencias se les reduce la demanda de temperatura para mantener el aire interior en estado estable. De hecho, hacia el final del proceso se mantienen en unos 1100°C, lo cual indica que la temperatura del aire interno del horno mantiene su calor de una buena manera y así las resistencias no precisan trabajar en condiciones máximas durante todo el proceso.

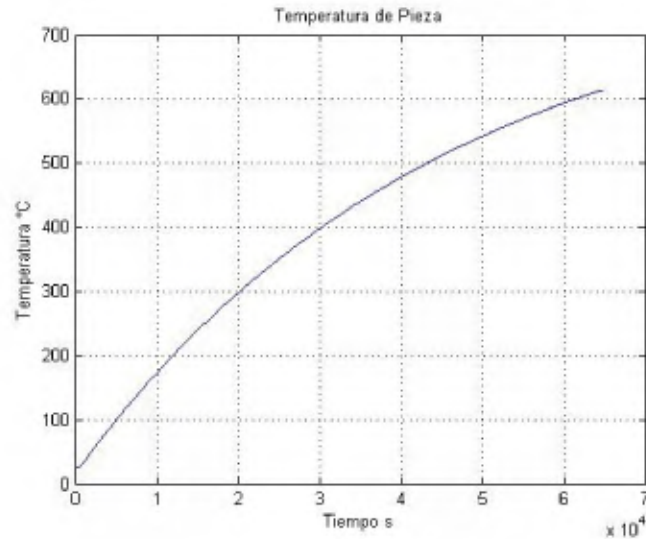
Gráfico 5.21 Modelado de situación experimental. Temperatura del aire en condiciones de temperatura constante del aire.



Fuente: Los Autores, 2013.

La temperatura del aire se mantiene en 800°C aproximadamente en una condición estable y sin muchas variaciones, con lo cual habría que esperar a que el ambiente calentado a este nivel pueda transmitir todo ese calor a la pieza de 2500 kg.

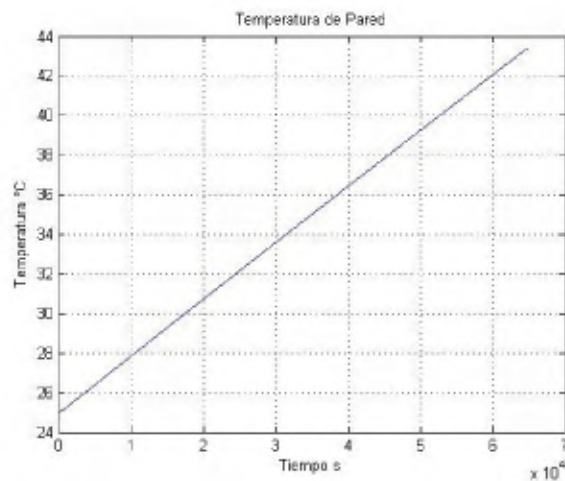
Gráfico 5.22 Modelado de situación experimental. Temperatura de la pieza en condiciones de temperatura constante del aire.



Fuente: Los Autores, 2013.

Si se mantienen éstas condiciones, la pieza alcanzaría una temperatura de 600°C luego de dieciocho horas de funcionamiento, lo que es excesivo. Por ello, se debe contemplar la situación de variar la forma de operar el horno para que el aire interno aumente su temperatura a una mayor velocidad que la actual. Esto se puede hacer con la seguridad de que las paredes no sufrirán daño según se demostró en el modelado propuesto en la sección 5.6.1, donde las condiciones de temperatura interna del horno eran muy elevadas pero las paredes no presentaron problemas al mantener esta temperatura interna, y con esto la pieza puede alcanzar la temperatura de 600°C con una mayor facilidad.

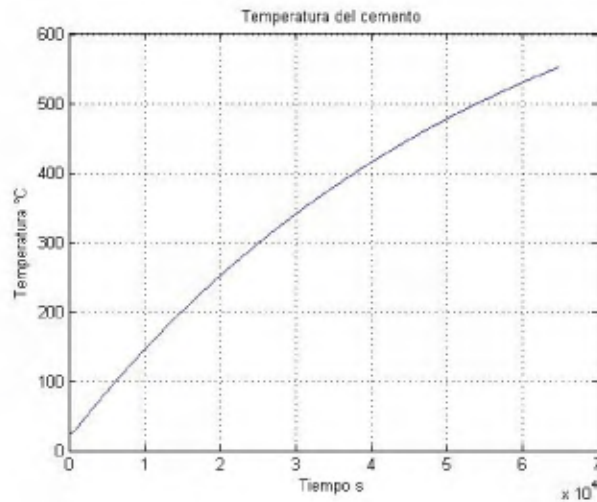
Gráfico 5.23 Modelado de situación experimental. Temperatura de la pared en condiciones de temperatura constante del aire.



Fuente: Los Autores, 2013.

Para este caso de simulación, se pueden observar que las paredes presentan una mayor temperatura dado a la altísima exposición de calor durante largo tiempo; el refractario imprime una resistividad térmica pero no es infinita, por lo que las paredes subirán de temperatura. Sin embargo, este valor de 43°C no presenta una amenaza significativa para la infraestructura del horno.

Gráfico 5.24 Modelado de situación experimental. Temperatura del cemento en condiciones de temperatura del aire constante.



Fuente: Los Autores, 2013.

En el caso de la temperatura de los rodamientos, se tiene una temperatura de 550°C aproximadamente, debido a la misma exposición de calor por tanto periodo de tiempo, de igual manera, siempre y cuando los rodamientos trabajen cuando el horno esta en temperaturas menores a 350°C no habrá problema alguno.

5.6.3 Resumen de modelos

Los análisis mostrados con anterioridad presentan situaciones muy importantes que se pueden transformar en mejoras al sistema de calentamiento. La propuesta de trabajo parte del resumen de datos que se muestra en el cuadro 5.8.

Cuadro 5.31 Resumen de modelos matemáticos experimentales

Elementos	Temperatura en Escenarios (°C)	
	A	B
Resistencias	3000	1100
Aire interno	1650	800
Pieza	680	630
Paredes	37	43
Concreto	575	550

Fuente: Los Autores, 2013.

Del modelo experimental propuesto en la sección 5.6.1 en donde se establecen las resistencias para que trabajen siempre a 3000°C, se puede rescatar que el ambiente interno del horno en el transcurso de 8 horas, presenta una temperatura de 1650°C, la pieza llega a 680°C, el concreto alcanza una temperatura de 550°C, y las paredes en este tiempo apenas presentan una temperatura cercana a los 37°C. En suma, se garantiza seguridad estructural por cuanto no hay dilatación ni disminución significativa de la resistencia a esfuerzos. Como este escenario es con una temperatura supuesta para las resistencias que en realidad no alcanzarán, el diseño es conservador.

En el modelo experimental propuesto en la sección 5.6.2 se tiene un panorama de dieciocho horas de trabajo bajo condiciones de aire interno estable a 800°C, las resistencias oscilaron entre temperaturas para poder mantener este ambiente controlado y luego de este tiempo de trabajo tan extenso presentaron valores en su temperatura de 1100°C, la pieza alcanza 630°C, las paredes al estar más tiempo en condiciones de calentamiento alcanzan una temperatura de 43°C y el concreto inferior ronda los 550°C. En este panorama el tiempo de trabajo sobre la pieza es extenso y muy elevado.

Por tanto, con estas dos perspectivas analizadas se puede concluir que el taller debe modificar la forma de operar el horno, en donde se debe aumentar la temperatura de las resistencias, y se debe alargar el tiempo de tratamiento sobre la pieza; para obtener de esta forma un calentamiento más favorable. Estas modificaciones se pueden realizar contemplando que ya no se tendría la problemática donde las paredes del horno no podían soportar valores de temperatura del aire interno muy elevadas, ya que la dilatación comprometía la seguridad, situaciones plasmadas en los modelados experimentales realizados anteriormente.

5.7 Eficiencia estimada del diseño propuesto.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el cálculo de eficiencia de la sección 4.6 se tiene ahora que calcular la resistividad del horno y la energía aprovechada de cada elemento para la condición propuesta, por lo tanto en esta nueva situación, al incluir la resistencia que proporciona el ladrillo refractario al sistema se puede realizar la equivalencia de resistividad del horno para las condiciones de diseño propuestas y de esta manera poder comparar ambas resistencias térmicas, que es lo que se observa en el cuadro 5.9:

Cuadro 5.32 Equivalencia de resistencias térmicas del horno con diseño propuesto aplicado.

Equivalencia de resistencias del horno propuesto								
Variable	R1	R2	R5	1/(R1+R2)	1/R5	R _{total}	1/R _{total}	Unidades
Valor	2,16	3,51	0,17	0,18	5,73	5,91	0,17	K/W

Fuente: Los Autores, 2013.

Comparando los resultados de los cuadros 4.14 (sección 4.6) y 5.9 se puede observar una gran mejoría en cuanto a la resistividad térmica total del horno, y como consecuencia, se asegura una mejor retención de calor interno y por tanto una mejor eficiencia.

Se debe especificar que las pérdidas de calor por fuentes externas plasmadas en la sección 4.4, no se contemplan para este cálculo, si bien ese es un factor que disminuye el calor interno del horno, no se tomará en cuenta ya que es un valor que se estima directamente en la pérdida de potencia y flujo de calor, y no forma parte de la resistividad del horno, pero debe destacarse que ese factor externo reduce aún más la posibilidad actual del horno de mantener el calor interno, hecho que es relevante mencionar.

Con estos valores de resistencias se puede analizar un porcentaje de mejoría en cuanto a los modelos establecidos utilizando la ecuación 69 (sección 4.6), siendo ese porcentaje es el siguiente:

$$Eficiencia = \frac{(R_{propuesta} - R_{actual})}{R_{actual}} \cdot 100 \quad (79)$$

$$Eficiencia = \frac{(0,17 - 0,07)}{0,07} \cdot 100$$

$$Eficiencia = 130,75\% \approx 131\%$$

Con base en el resultado anterior, es posible contemplar como la efectividad del horno con los cambios propuestos rondan una mejoría de un 131%, aproximadamente, con lo cual se establece que la capacidad de mantener el calor interno y, por ende, calentar más efectivamente la pieza se aumenta en un valor considerable, tomando en cuenta las condiciones actuales contra las propuestas en el nuevo diseño. Con este dato de aumento significativo de resistencia térmica se puede dar paso al análisis de la eficiencia del horno por la capacidad de calentar la pieza, lo cual es, en esencia, es un estudio de la energía que necesita la pieza para ser calentada, un aumento en este aspecto es altamente significativo y se debe analizar para completar el estudio de la eficiencia del horno.

En la sección 4.6 se calculó la eficiencia estimada para la condición actual. Para el estudio del sistema con el nuevo diseño aplicado se tiene el siguiente cuadro de datos:

Cuadro 5.33 Datos de temperatura y energía de elementos en el diseño propuesto.

Nuevo Diseño					
Elemento	Temp inicial (°C)	Temp final (°C)	Δ Temp (°C)	m·c_p(J/K)	m·c_p·ΔT (kJ)
Piso	25	110	85	325.140	27.637
Paredes y techo	25	33	8	238.700	1.910
Pieza	25	385	360	1.150.000	414.000
Exfiltraciones	25	25	0	0	0
Aire	25	800	775	15.099	11.702

Fuente: Los Autores, 2013.

Luego de simular el sistema de diseño propuesto durante un periodo de ocho horas, se puede notar como la energía es notablemente menor para las paredes, el techo y el piso de concreto. De igual manera se notan aumentos en la energía de la pieza; el siguiente cuadro resumen demuestra más específicamente los datos obtenidos:

Cuadro 5.34 Energía consumida por cada elemento para aumentar su temperatura.

Elemento	Condición nueva (kJ) ($m \cdot c_p \cdot \Delta T$)
Pared este	1 910
Pared sur	1 910
Pared oeste	1 910
Puerta	1 910
Piso	27 637
Techo	1 910
Exfiltraciones	0
Pérdidas por varillas	780,4
Calentamiento pieza	414 000
Otros... (Aire)	11 702

Fuente: Los Autores, 2013.

Se puede observar como del cuadro 5.11, la energía correspondiente a las paredes, el piso, el techo y la puerta son menores en comparación con las obtenidas en la condición actual (sección 4.6). Por consiguiente, producto del aumento de la resistencia por parte del refractario, se puede notar como estos elementos han consumido menos energía. Sin embargo, al observar la pieza, se puede prestar atención al ligero aumento de 5 750 kJ que ha tenido en comparación con el cálculo de condiciones actuales del horno.

Esta situación se debe principalmente a que la convección del aire dentro del horno no es suficiente: la tasa de transferencia de la pieza no cambia si el aire caliente interno no se mueve de una mejor manera hacia la pieza. Por ello, en condiciones de flujo iguales la transferencia de calor es la misma aunque se tenga un horno sumamente resistente a altas temperaturas.

La forma de mejorar esta tasa de transferencia es aumentando la convección del aire caliente en la pieza y por lo tanto para poder lograr realizar este movimiento se tiene el sistema propuesto en la subsección 5.4.1 donde se emplea un deflector del aire caliente hacia la pieza. Así se puede obtener una mejor transferencia y por ende calentamiento más efectivo gracias a que aumenta la convección superficial de forma forzada.

Realizando un análisis sobre el posible resultado de este fenómeno de convección forzada, se puede efectuar un estudio en el modelo matemático, variando los coeficientes de convección de las paredes y de la pieza para observar cómo se calienta la pieza bajo estas condiciones. La idea fundamental es aumentar la convección de la pieza y disminuirla en las paredes ya que antes el aire

era lanzado hacia las paredes del horno; en cambio ahora se propone con el nuevo diseño del deflector que el aire sea lanzado hacia la pieza prácticamente en su totalidad.

No se cuenta con la cantidad de aire que se mueve hacia la pieza pero se puede obtener un resultado posible al manipular los coeficientes de convección del sistema matemático para obtener resultados simulados.

Para el siguiente caso se tiene un aumento gradual del coeficiente de convección para observar cual es el cambio de la temperatura de la pieza luego de trabajar bajo un tiempo de 8 horas y con las resistencias propuestas de diseño mejorado.

Cuadro 5.35 Resultados obtenidos al modificar la convección de elementos.

Elementos	Coefficiente de Convección	Temperatura (°C)
Paredes	6	33
Pieza	6	385
Coefficiente aumentado en 20%		
Paredes	4,8	33
Pieza	7,2	430
Coefficiente aumentado en 40%		
Paredes	3,6	33
Pieza	8,4	470
Coefficiente aumentado en 60%		
Paredes	2,4	32
Pieza	9,6	500
Coefficiente aumentado en 80%		
Paredes	1,2	31
Pieza	10,8	550

Fuente: Los autores, 2014.

Se puede observar que al modificar la convección aumentándola porcentualmente para la pieza y disminuyéndola de las paredes, la temperatura del elemento trabajado se incrementa por lo tanto es

posible que si se tiene un buen movimiento de aire interior dirigido hacia la pieza, se obtendrían mejores resultados y las paredes no se verían alteradas por el cambio.

Tomando en cuenta la información de esta sección y la información obtenida en la sección 4.6 específicamente del cuadro 4.16, donde se ve la energía requerida por la pieza, se puede evaluar con certeza cuan eficiente es el horno con todas las modificaciones propuestas a nivel energético. Utilizando la fórmula siguiente, se obtiene el aprovechamiento de energía de la pieza con respecto a la cantidad de energía que posee el horno, permitiendo calcular una relación que posteriormente serviría para poder calcular el cambio en la eficiencia del diseño propuesto.

$$\text{Aprovechamiento} = \frac{\text{energía entregada a la pieza (kJ)}}{\text{energía total del horno (kJ)}} \quad (80)$$

Por lo tanto utilizando la fórmula anterior y los datos mencionados se puede realizar una tabla resumen de aprovechamiento para cada situación planteada. De esta manera se obtienen datos experimentales posibles para realizar los cálculos de eficiencia requeridos mencionados con anterioridad.

Cuadro 5.36 Aprovechamiento de energía de la pieza a calentar.

Incremento de convección	Energía total del horno (kJ)(m·c _p ·ΔT)	Energía de la pieza (kJ)(m·c _p ·ΔT)	Temperatura final de la pieza (C°)	Aprovechamiento
Actual 0%	483583	408 250	380	0,84
Diseño propuesto con 0%	462889	414 000	385	0,89
Diseño propuesto con 20%	462889	465 750	430	1,01
Diseño propuesto con 40%	462889	511 750	470	1,11
Diseño propuesto con 60%	462889	546 250	500	1,18
Diseño propuesto con 80%	462889	603 750	550	1,30

Fuente: Los autores, 2014.

Por lo tanto, con los datos de aprovechamiento se puede realizar el cálculo de eficiencia utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia} = \frac{(\text{Aprovechamiento propuesto} - \text{Aprovechamiento actual})}{\text{Aprovechamiento actual}} \cdot 100 \quad (81)$$

Por ende se tienen los siguientes escenarios mostrados, al aplicar la fórmula anterior para cada uno de los casos propuestos:

Cuadro 5.37 Eficiencia energética obtenida para cada caso posible

Situación	Eficiencia
Actual 0%	0,00%
Nuevo diseño al 0%	4,96%
Nuevo diseño al 20%	18,08%
Nuevo diseño al 40%	29,74%
Nuevo diseño al 60%	38,49%
Nuevo diseño al 80%	53,06%

Fuente: Los Autores, 2014.

De esta forma se tiene un ámbito de eficiencia posible en el cual si se aumenta la convección superficial de la pieza, la temperatura se incrementa y sube la eficiencia energética del sistema respecto de la pieza ya que al operar bajo las mismas condiciones, el simple hecho de dirigir el aire caliente hacia la pieza logra aumentar la capacidad de calentamiento de la misma obteniendo mejoras desde un 4,96% hasta un 53,06% posibles en la eficiencia energética.

5.8 Movilidad de la compuerta del horno: consideraciones y propuesta.

Uno de los problemas que se presenta en el procedimiento de alivio de tensiones tiene que ver con el accionamiento de la compuerta del horno, esta es de tipo guillotina; y se cierra y abre por medio de un montacargas que engancha un perno en la parte superior de la puerta. Esta es una práctica inapropiada ya que atenta contra la seguridad de los empleados del taller, además que se emplea el montacargas en operaciones donde no debería de ser utilizado por lo que los tiempos efectivos de operación de este se ven reducidos.



Ilustración 5.60 Montacargas en proceso de apertura de puerta del horno

Fuente: Los autores, 2013.

El método propuesto para la apertura y cierre de la compuerta consiste en la instalación de un tecele, suspendido en la parte superior del horno, que sea capaz de soportar el peso de la puerta junto con los ladrillos refractarios aislantes. La masa de la puerta, de acuerdo con datos suministrados por el personal del taller Anonos, es de 500 kg.

Para calcular el peso de los ladrillos moldeados se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Cuadro 5.38 Datos para la obtención del peso del ladrillo moldeado.

	Alto	Ancho	Largo	Área(m ²)
Puerta del horno	1,7 m		2,7m	4.59
Ladrillo	6.85 cm	11.93 cm	23.3 cm	
Área de contacto de ladrillo con puerta	6,85cm		23.3cm	0,0159
Volumen del ladrillo				0,00190 m ³
Densidad promedio del ladrillo				465kg/ m ³
Cantidad de ladrillos				290

Fuente: Los autores, 2013.

En el diseño se tomó en cuenta una ciza de 5 mm entre cada ladrillo en donde se colocará material para juntas Thermal Ceramics. Aplicando la ecuación de densidad para obtener el peso de la pared de ladrillo, se obtiene:

$$Densidad_{ladrillo} = \frac{Masa_{ladrillo}}{Volumen_{ladrillo}} \quad (82)$$

$$Masa_{ladrillo} = Volumen_{ladrillo} \cdot Densidad_{ladrillo}$$

$$Masa_{ladrillo} = 0.00190 m^3 \cdot 465 Kg/m^3$$

$$Masa_{ladrillo} = 0,8835 \text{ kg}$$

$$Masa_{total} = 255 \text{ kg}$$

El diseño de las paredes y el techo se realizó conforme a la Ilustración 5.4 con el fin de optimizar el uso del material aislante. Se trató de evitar que fuera necesario cortar o modificar los ladrillos disponibles comercialmente. Además con este tipo de diseño se busca que el área de contacto entre cada ladrillo y la pared del horno sea la mínima para así darle libertad de movimiento suficiente como para tolerar las diferencias dimensionales que surjan por los ciclos de contracción y dilatación térmica.

En el caso de la puerta, la colocación de los ladrillos no se diseñó como se muestra en la Ilustración 5.4 para que no quede excesivamente pesada. De ser así, los ladrillos de la puerta aportarían 460 kg de masa a los 500 kg actuales de la puerta. De lo contrario, si se colocan los ladrillos como la ilustración 5.17 se consigue reducir significativamente la masa.



Ilustración 5.61 Formación tipo hilera diseñada para los ladrillos refractarios de la puerta del horno

Fuente: Thermal Ceramics, 2009.

Con esta configuración la masa total es de 255 kg, con lo que prácticamente se consigue la mitad del peso anterior.

5.8.1 Estructura de la compuerta del horno

La estructura propuesta para soportar el peso de la puerta del horno y del tecele que la va a abrir y cerrar consiste en dos marcos metálicos de acero estructural arriostrados y unidos por dos vigas metálicas del mismo material, una de las cuales soportará una carga puntual en el centro del claro. Las dimensiones propuestas para las vigas son secciones de acero laminado en frío de tubo estructural de 200 mm x 100 mm x 3,17 mm, y los elementos de los marcos de tubo estructural de 72 mm x 72 mm x 3,17 mm de espesor.

En el siguiente cuadro se muestran las propiedades del material que se consideró para el modelo de la estructura del tecele.

Cuadro 5.39 Datos de los materiales utilizados para el diseño de la estructura de soporte del tecle.

Constantes del materiales utilizados en la estructura	
Esfuerzo de fluencia F_y	2 315 kg/cm ²
Módulo de elasticidad E	2 100 000 kg/cm ²
Módulo de Poisson ν	0,3

Fuente: Los autores, 2013.

En la ilustración 5.18 se muestra un diagrama de la estructura propuesta, que se elaboró con el programa de computadora SAP junto con una vista frontal de la estructura en dos dimensiones. Las cotas se encuentran en metros.

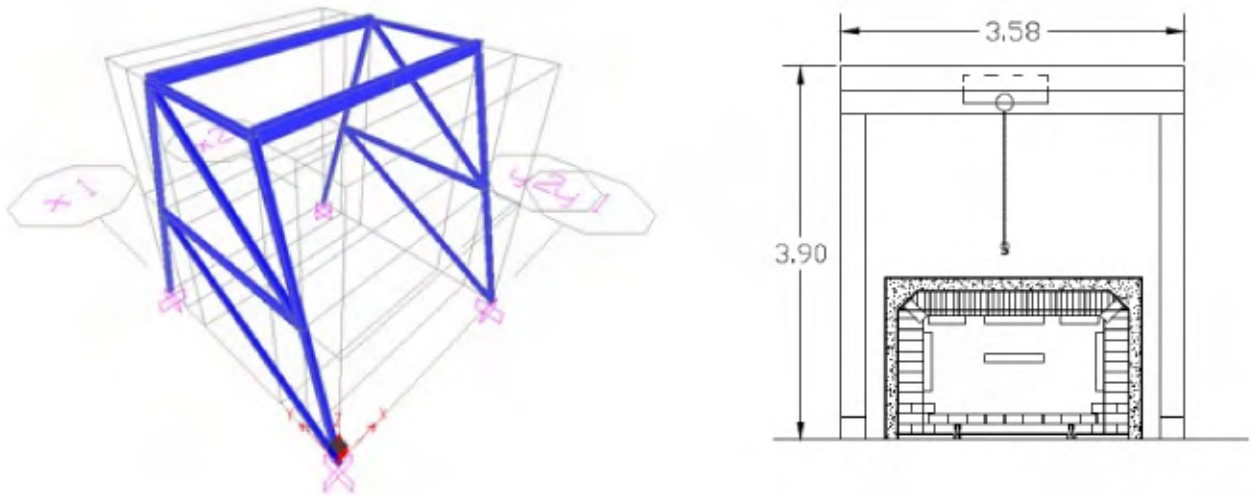


Ilustración 5.62 Diagrama y diseño en 2D de la estructura de soporte del tecle.

Fuente: Los Autores, 2013.

Para este diseño que se utilizó como guía las directrices establecidas en el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

5.8.2 Geometría de la estructura y método de cálculo asistido

Como se mencionó anteriormente, el análisis y diseño se realizó conforme al Código Sísmico de Costa Rica (2010) y el código AISC (American Institute of Steel Construction). Para llevar a cabo los cálculos de cargas nodales y esfuerzos puntuales, se utilizó el programa de cómputo de análisis estructural SAP2000 v.11. En la ilustración 5.19 se muestra un esquema del modelo:

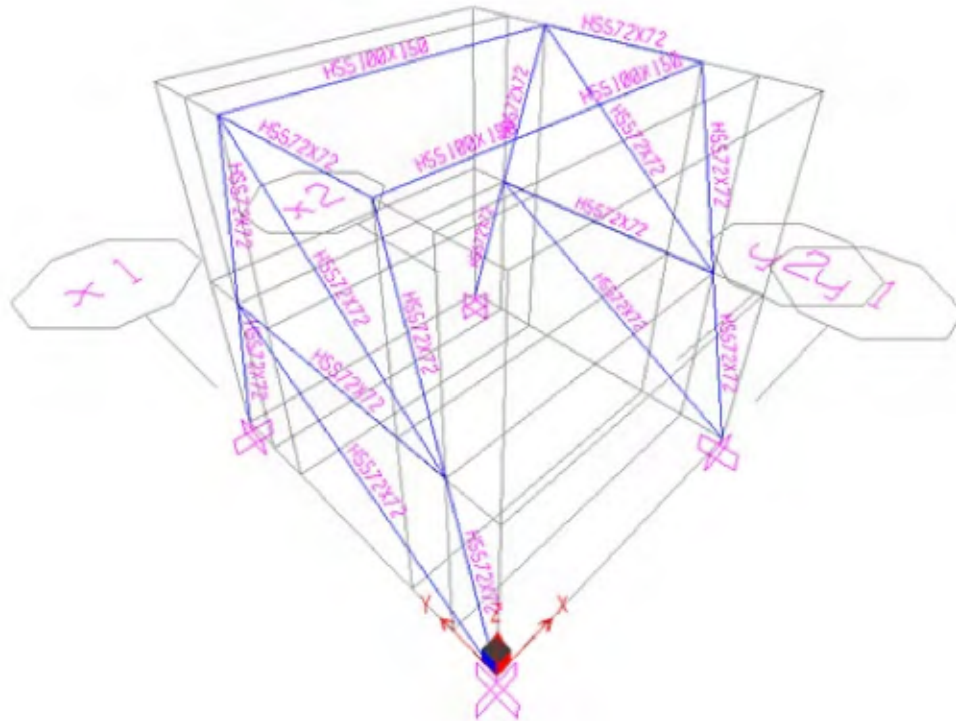


Ilustración 5.63 Modelo en SAP 2000 para la estructura del tecla.

Los Autores, 2013

En esquema del modelo se puede observar el plano junto con los diferentes perfiles escogidos y las dimensiones propuestas para las vigas. Estos elementos son secciones de tubo estructural de acero laminado en frío. Seguidamente se expondrán las condiciones de frontera de las fuerzas presentes para el sistema diseñado. Los apoyos se consideran las fuerzas de tensión que soportan los pernos y la fuerza de compresión del concreto.

5.8.3 Cargas actuantes

Para el caso del diseño de la estructura del sistema de apertura y cierre de la puerta del horno, el efecto de las cargas que pueden tener participación se estima según el procedimiento establecido por el *Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos* de Costa Rica.]

5.8.3.1 Carga permanente

Como lo menciona el Código Sísmico de Costa Rica 2010, este valor debe incluir los pesos propios de elementos constructivos, sean estructurales o no, como vigas, columnas, muros, particiones livianas y techos. También deben incluirse pesos de sistemas y componentes arquitectónicos, eléctricos y mecánicos, unidos a la estructura de manera que resistan las fuerzas a las que estará sometido.

Para el caso del horno en estudio el valor de la carga permanente lo compone el peso del tecele y el peso de la puerta del horno. El tecele, de acuerdo con la información del utilizado para la propuesta, tiene una masa de 100 kg, la puerta del horno como se mencionó anteriormente es de aproximadamente 755 kg; para propósitos del diseño se consideró una carga permanente asociada a una masa de 1.000 kg.

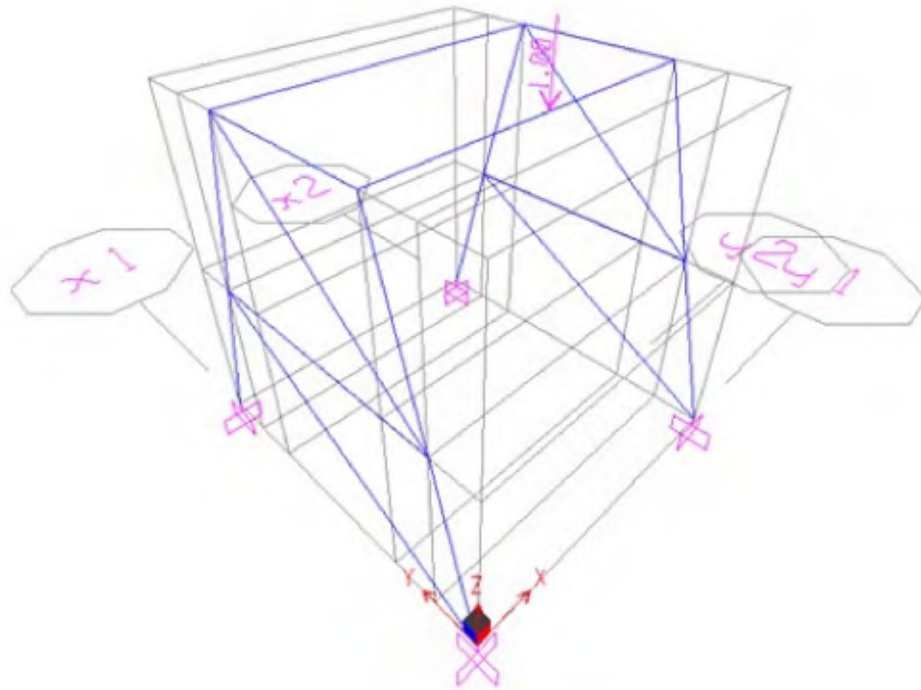


Ilustración 5.64 Representación computarizada de la carga permanente de 1 tonelada sobre la estructura de soporte.

Fuente: Los Autores, 2013.

En la ilustración 5.20 se muestra el análisis de la carga permanente utilizada, que para este caso es del peso correspondiente a la masa de 1000 kg y se ubica en el punto medio de la viga horizontal tal y como se muestra en la ilustración 5.20. Se supuso este punto de la viga por el hecho que el punto medio es el que más estabilidad va a generar en el movimiento de la compuerta y se supuso puntual puesto que se trata de un peso que generará la puerta en el cable del tecele (el peso del tecele también se consideró dentro de esta carga puntual).

5.8.3.2 Carga temporal

La carga temporal es la producida por las personas al subirse a la estructura ya sea para darle mantenimiento o por alguna otra razón. Los valores de carga temporal se tomaron del Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Corresponde para este caso un valor de carga temporal del 40 kg/m^2 , al estar incluida la estructura de soporte del tecele en *techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros*, como se observa en el cuadro 9.1 del Anexo 9.

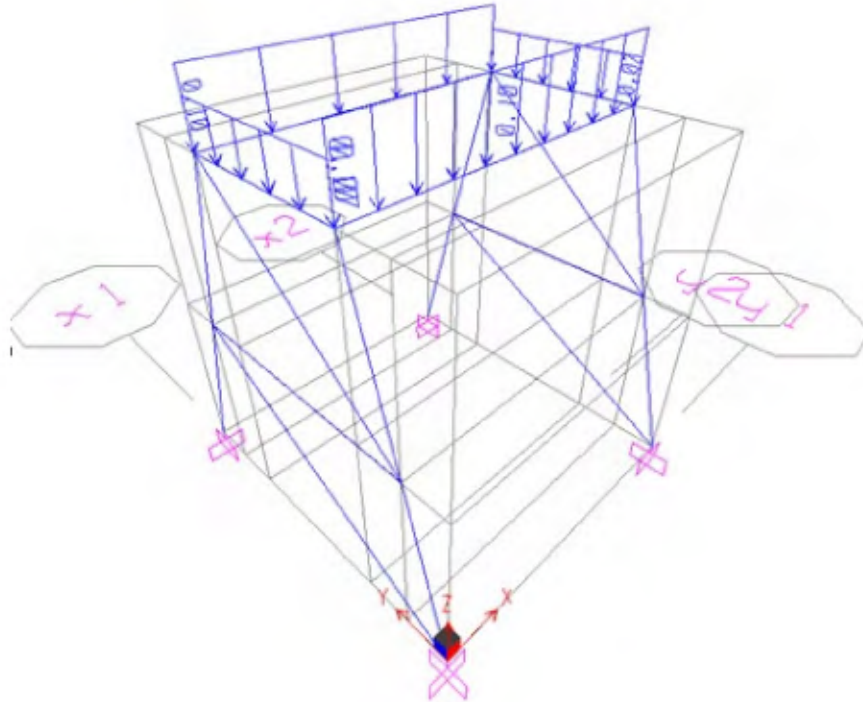


Ilustración 5.65 Representación computarizada de la carga temporal de 40 kg/m^2 sobre la estructura de soporte.

Fuente: Los Autores, 2013.

La ilustración 5.21 expone el esquema con la carga temporal para la cual se diseña la estructura. Como se mencionó anteriormente esta carga contempla más que todo dentro de la aplicación en el taller cuando se realizan mantenimientos preventivos o correctivos en la estructura o del sistema de apertura o cierre del horno.

5.8.3.3 Carga sísmica [CITATION Col10 \l 5130]

Para el análisis de esfuerzos de la estructura se consideró también la carga sísmica que podría presentarse en caso de un evento natural de este tipo.

Costa Rica es un país donde la actividad sísmica es una constante. Son frecuentes los sismos en el territorio nacional al estar ubicado este en una zona de subducción de placas donde interactúan tres placas principales: Cocos, Caribe y Nazca [CITATION Uni13 \l 5130]

Las consideraciones que se tomaron para este caso son las siguientes:

- **Peso sísmico = 1,54 ton.** Este valor es obtenido de sumar la carga permanente aplicada de 1 ton más 0.54 ton del peso propio de la estructura, el cual calcula el programa SAP a partir del peso específico del acero y las secciones transversales que componen los elementos de la estructura, de acuerdo con la sección 6.1.3 del código sísmico de Costa Rica 2010.
- **Zonificación sísmica:** de acuerdo con el Código Sísmico 2010, para tales efectos el país se divide en tres zonas sísmicas de sismicidad ascendente, para la ubicación del Taller, se clasifica esta zona como *Zona III*, por estar ubicado en la provincia de San José, y de acuerdo con el cuadro 6.3
- **Sitio de cimentación:** el sitio de cimentación es el lugar de emplazamiento de una edificación para efectos de considerar las condiciones dinámicas del sitio en la demanda sísmica. En este caso, es un *Sitio tipo S₃*, donde se tiene un perfil de suelo con más de 6 m de arcilla de consistencia de suave a medianamente rígida o de suelos no cohesivos de poca o media densidad [CITATION Col101 \l 5130].
- **Aceleración pico efectiva de diseño a_{ef} :** con base en la zonificación sísmica y el sitio de cimentación se establecen los valores de aceleración pico efectiva de diseño, como parámetro indicador de la sacudida sísmica correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, para el caso en estudio y basado en los valores observados en el cuadro 6.6, la a_{ef} es de 0,36.
- **Ductilidad global asignada $\mu = 3$,** [Esto corresponde a una estructura tipo marco, regular, con ductilidad local moderada, según la tabla 4.3 del CSCR 10
- **Importancia $I = 1.0$.** Grupo C. Edificaciones de Ocupación Especial. De acuerdo con el cuadro 6.6
- **Sobre resistencia:** como resultado de varias consideraciones mencionadas en el Código Sísmico de Costa Rica 2010, todo sistema estructural posee una capacidad real sismo resistente que es mayor que la capacidad nominal sismo resistente, siendo la sobre resistencia, SR, la razón entre ambas capacidades. $SR = 2$ para la instalación en cuestión, al tratarse de una estructura tipo marco.
- **FED, factor espectral dinámico:** es la modificación en aceleración que sufre un sistema de un grado de libertad con respecto a la aceleración del suelo y es función de la zona sísmica, del sitio de cimentación, de la ductilidad global asignada y del periodo. El valor para este caso se obtuvo del cuadro 6.5 mostrada en el Anexo 6.1 y corresponde a 1.12.

- **Coefficiente sísmico:** se calcula para posteriormente obtener la carga sísmica y se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{sis} = \frac{a_{ef} \cdot I \cdot FED}{SR} \quad (83)$$

$$C_{sis} = \frac{0,36 \cdot 1,0 \cdot 1,12}{2} = 0,2$$

$$Carga \text{ sísmica} = 0,2 \cdot 1,54 = 0,31$$

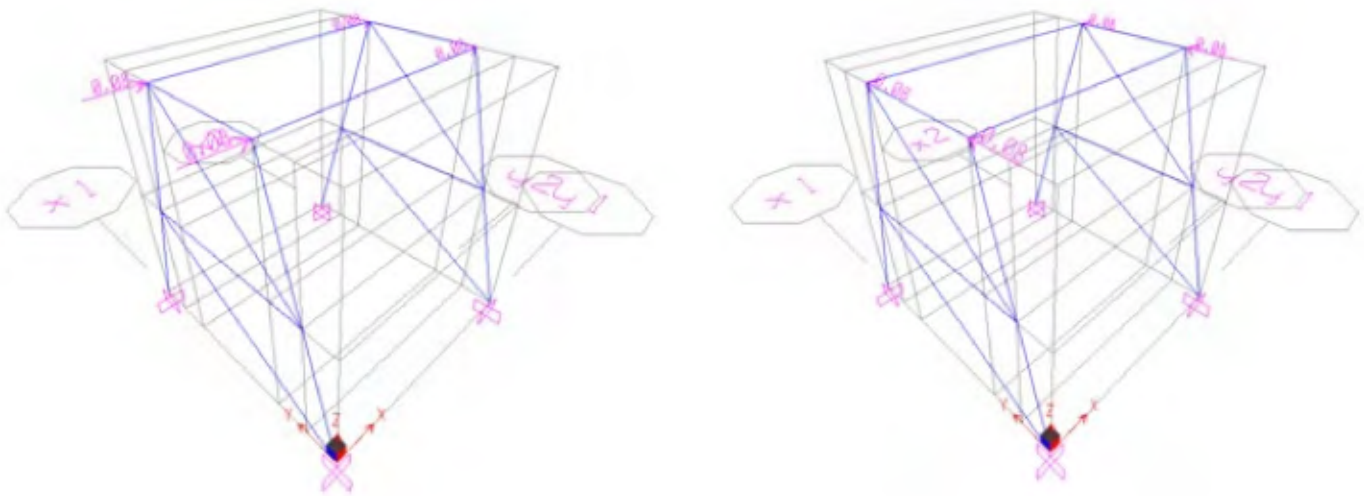


Ilustración 5.66 Ubicación de la carga sísmica en dirección del eje X y del eje Y

Fuente: Los Autores, 2013.

En la ilustración 5.22 se pueden observar los diagramas de la estructura con la carga sísmica ubicada según el método considerado por el Código sísmico de Costa Rica tanto para sismo en el eje X como el sismo para el eje Y

De acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica, sección 6.2, para el cálculo de la resistencia de una estructura, cada elemento, componente o unión de esta, y como unidad, debe tener capacidad para resistir las siguientes combinaciones de cargas últimas

$$CU = 1,4 CP \quad (84)$$

$$CU = 1,2 CP + 1,6 CT \quad (85)$$

$$CU = 1,05 CP + CT \pm \quad (86)$$

$$CU = 0,95 CP \pm \quad (87)$$

Donde:

CU = carga última de diseño.

CP = carga permanente.

CT = carga temporal.

CS = carga sísmica.

En el diseño para carga última, *CU*, los elementos, componentes y uniones deben ser proporcionados usando métodos de diseño por resistencia con los esfuerzos últimos especificados para el diseño estático. No se permite modificación alguna de los esfuerzos al considerarse la carga sísmica.[CITATION Col101 \l 1046]

5.8.4 Resultados del análisis

Utilizando todas las cargas calculadas se procede a introducir los cálculos al software empleada generándose los resultados siguientes:

Ilustración 5.67
por carga

Fuente: Los

En la ilustración gráficamente los generados por En este caso se para la carga el perfil momentos ilustración.

Los momentos la carga sísmica tanto el eje Y se ilustraciones del

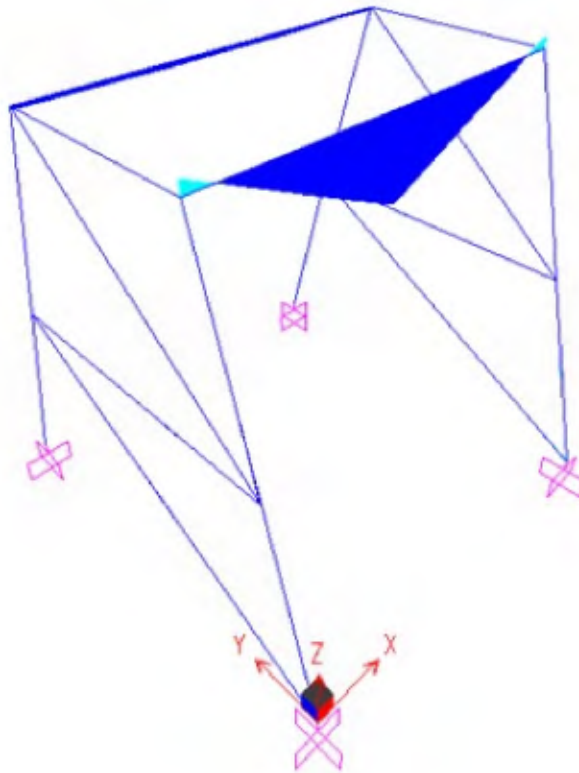


Diagrama de momentos
permanente CP.

Autores, 2013.

5.23 se muestran momentos flexionantes las cargas permanentes. puede observar que permanente y utilizando escogido resulta los indicados en la

flexionantes debidos a temporal y por la carga para el eje X como para muestran en las Anexo 8.

El cuadro 5.13 resume los resultados del diseño obtenidos con el programa de análisis. La columna muestra la relación entre esfuerzo y esfuerzo último del elemento. Además, la columna *Sección de diseño* muestra cada eslabón que compone la estructura. Además, como se puede observar, la columna denominada *relación esfuerzo/esfuerzo último* lo que busca es comprobar si cada uno de los eslabones es capaz de soportar los esfuerzos con que fue diseñada la estructura.

El modelo numérico conformado por SAP2000 contempla los estados límite de flexión, tensión, compresión, cortante y pandeo. Es por ello que si la relación entre el esfuerzo y el esfuerzo último

es menor a 1 entonces el eslabón en cuestión soporta el esfuerzo de diseño según ese criterio de falla.

Cuadro 5.40 Resumen de datos obtenidos para la estructura

	Sección de diseño	Relación esfuerzo/esfuerzo último
2	HSS72X72	0,383337
3	HSS72X72	0,42209
4	HSS72X72	0,095267
5	HSS72X72	0,51247
6	HSS72X72	0,6683
7	HSS72X72	0,383337
8	HSS72X72	0,42209
9	HSS72X72	0,095267
10	HSS72X72	0,51247
11	HSS72X72	0,6683
13	HSS100X150	0,176462
14	HSS72X72	0,128721
15	HSS72X72	0,074535
16	HSS72X72	0,152138
17	HSS72X72	0,128721
18	HSS72X72	0,074535
19	HSS72X72	0,152138
20	HSS100X150	0,734238
21	HSS100X150	0,734238

Fuente: SAP

Como se puede ver para todos los eslabones de la estructura la *relación esfuerzo/esfuerzo último* es menor a uno, por lo que el sistema diseñado soportará los esfuerzos considerados para el modelado del sistema.

5.8.5 Ensamble del conjunto

Como modo de tener una visión más detallada del diseño final del sistema completo, se utiliza los planos en AutoCAD y el diseño del sistema de apertura y cierre de la compuerta del horno y se unifica utilizando el programa SketchUp en la ilustración 5.24.

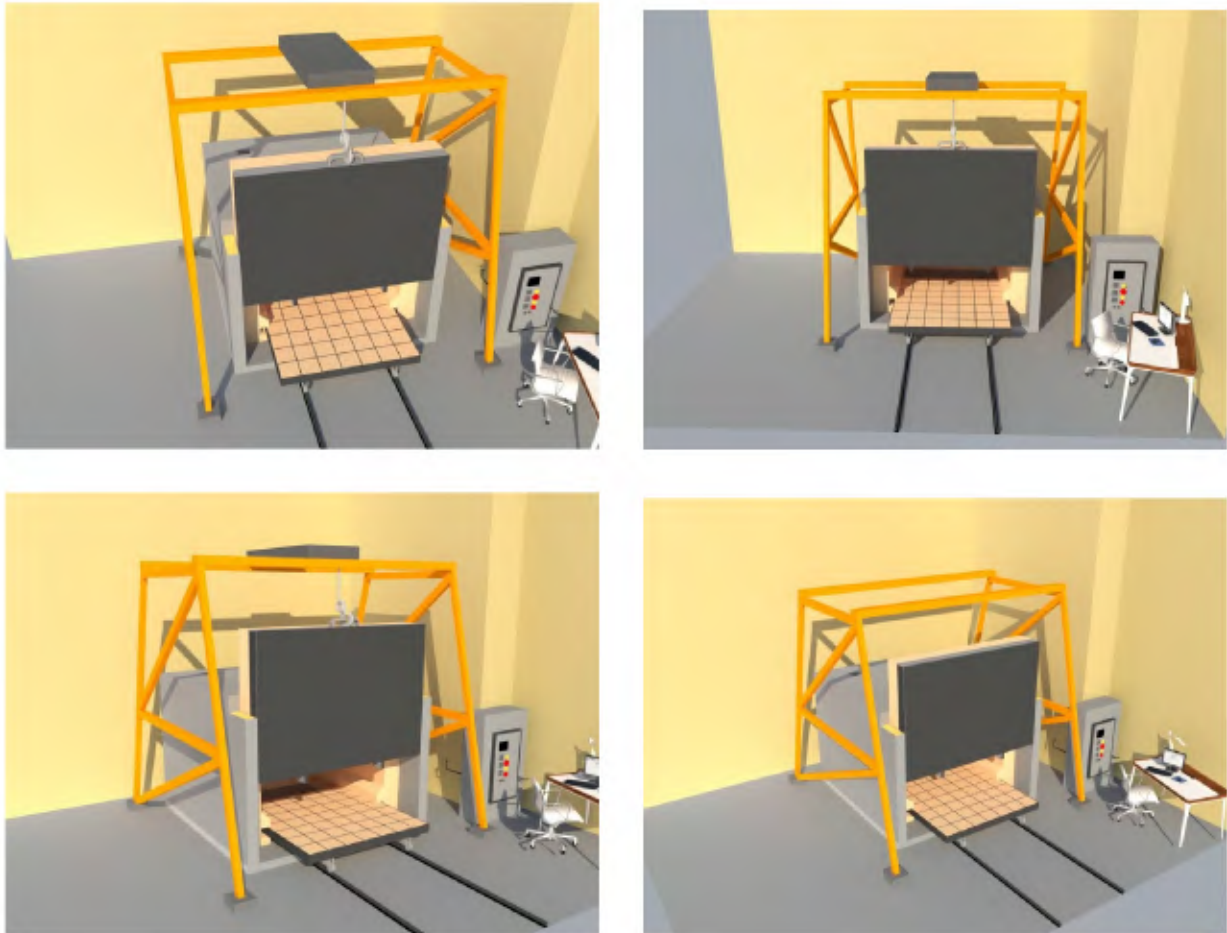


Ilustración 5.68 Vista general del ensamble propuesta.

Fuente: Los Autores, 2013

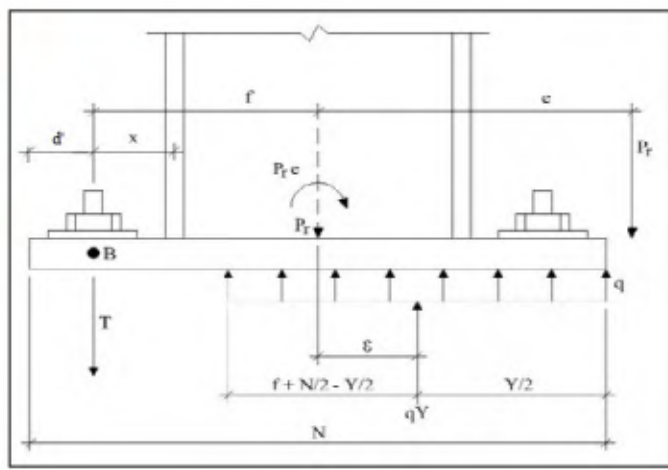


Ilustración 5.69 Esquema del anclaje del soporte de la estructura al suelo.

Fuente: Los autores, 2013.

Como se estudió en la sección 3.4, los cimientos son la parte del horno que se apoya directamente en el suelo y que sostiene las demás partes del mismo. Lo único que se requiere de los cimientos es una absoluta solidez para aguantar toda la carga estática de las partes dispuestas encima, así como las eventuales cargas dinámicas, sin sufrir deterioro alguno. Deben tener dimensiones suficientes para que la presión contra el suelo no supere los valores admisibles.

En el diseño propuesto se mantiene la cimentación existente dentro del taller, es decir se mantiene la losa de concreto. Lo que se propone es un anclaje para la estructura tal y como se muestra en la ilustración 5.25. Esta consiste de varillas roscadas ancladas a la losa existente mediante una placa metálica. El mismo fue realizado considerando un equilibrio de fuerzas y momentos en la sección de la placa, sobre la cual actúan las fuerzas de tensión que soportan los pernos y la fuerza de compresión del concreto. Los resultados que se desprenden de este análisis permiten obtener las tensiones en los pernos y los momentos flectores actuantes en la placa metálica, lo cual permite el dimensionamiento obtenido.

6 Conclusiones

- Para evaluar el rendimiento térmico de la configuración actual del horno, se optó por modelos de transferencia de calor de cuerpos concentrados para conformar un balance de energía transitorio con condiciones de frontera conocidas. Este método se aplicó a cada una

de las fronteras que conforman el volumen de control del horno, lo que resultó en un juego de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. Este sistema de ecuaciones son la plataforma de experimentación para este trabajo: no es tan preciso como un modelo discretizado, pero es mucho más flexible en términos de iterar espesores y tipos de material.

- Según las observaciones sobre el modelo de la condición actual, se propusieron y comprobaron mejoras sustanciales en cuanto a estructura tanto en configuración térmica como en nuevos procesos mecánicos para el funcionamiento adecuado del horno y de esta forma se lograron satisfacer las demandas de los procesos más exigentes que el horno podría trabajar. Entre las iteraciones de diseño, los autores experimentaron con el modelo variando la temperatura de las resistencias y temperatura interna del horno, con lo cual se estableció un patrón a seguir para mejorar el proceso de trabajo térmico sobre la pieza.
- Como una de las variables que queda fuera del modelo térmico concentrado es la uniformidad de temperaturas interiores, se dispusieron las resistencias eléctricas y el ventilador interno junto con un sistema de deflexión de flujo para aumentar la convección del aire caliente sobre la pieza a trabajar y así garantizar que la transferencia de calor por radiación y por convección forzada no estuviera sesgada por zonas.
- Gracias a la investigación acerca de diferentes materiales utilizados en hornos del tipo en estudio, se definió la opción más viable y eficiente que se apegara a las necesidades planteadas. Se determinó que el material que debía de revestir las paredes internas del horno debía ser un material aislante, refractario y, sobre todo, que tuviera características físicas que lo hicieran práctico en la operación. Uno de los aspectos físicos más importantes fue su peso, ya que colaboró a disminuir las cargas ejercidas sobre la estructura del horno. Además, se pudo estudiar y analizar la forma o método utilizado para la disposición física de los ladrillos. Con la disposición escogida se aseguró su movilidad suficiente para que no hubiera efectos adversos de los ciclos de dilatación térmica normales en el transcurso de la operación del horno.
- Un punto relevante en el diseño propuesto consistió en lograr un aislamiento entre los rieles y rodamientos de la bandeja utilizada para colocar y transportar las piezas que serán sometidas a tratamiento térmico, y el hogar del horno, que es donde las resistencias aumentan la temperatura interna y se alcanzan temperaturas elevadas que fácilmente podrían comprometer la movilización de la bandeja. El aislamiento se logró aprovechando el uso de los ladrillos como canal aislante, donde la superficie superior está en contacto con el área de mayor temperatura y su equivalente inferior, con una temperatura inferior, representando un aislamiento para el sistema de movilización.
- Un aspecto medular al diseño del horno es el mecanismo para abrir y cerrar el horno sin comprometer el aislamiento térmico, además de plantear una manera de movilizar las piezas para introducirlas o retirarlas del horno. Se decidió proyectar una estructura en acero que se anclara a la losa de concreto del taller para posteriormente instalar un teclé eléctrico

axial con capacidad de soportar el peso de la compuerta del horno. Para ello se realizaron simulaciones de los esfuerzos que se podrían generar en la estructura.

- En el caso de la puerta del horno, se diseñó una configuración física de los ladrillos aislantes refractarios diferente a la de las paredes del horno: se buscó disminuir las pérdidas de calor sin crear un peso excesivo en ella e innecesario. Las simulaciones permitieron una correcta optimización sin que las iteraciones de cálculo se volvieran engorrosas.
- Para obtener la carga térmica crítica, se caracterizó la pieza más compleja que se trabaja dentro del taller Anonos, tomando en cuenta aspectos como la masa y las dimensiones. Para esta condición se realizaron simulaciones de la transferencia de calor que indicaron la potencia eléctrica necesaria para obtener las temperaturas de proceso demandadas por una pieza compleja. Se decidió introducir resistencias, no solamente en el techo, como originalmente contaba el diseño anterior, sino que también en las paredes con el fin de aumentar la uniformidad del calor que junto a la ventilación forzada, impacta en la pieza tratada.
- En todos los cálculos, además, se demostró que el sistema de rodamientos es aceptable mientras no deban moverse cuando estén a una temperatura mayor a los 350°C. Esto es una condición realista en vista de que la bandeja estará en movimiento únicamente cuando la temperatura del horno sea lo suficientemente baja como para que un operario pueda acercarse sin riesgo al horno abierto. Además, cabe destacar que los rodamientos seleccionados son para aplicaciones de alta temperatura.
- Los cálculos demostraron que, al aumentar la cantidad de resistencias eléctricas que representan la entrada de calor del sistema, se tiene una mejor respuesta a la demanda energética sin que afecte el horno por temperaturas locales excesivas o dilatación térmica diferenciada mayor a la permisible. Esto se logró en particular por la selección del ladrillo refractario como material aislante.
- En cuanto al aumento de la eficiencia energética esperada se debe tener claro que representa un parámetro arbitrario por cuanto un horno en estado estable consume toda su potencia en pérdidas, y por ende una definición de eficiencia sólo es un indicador útil si es para comparar condiciones de trabajo idénticas. En ese sentido, se aplica perfectamente a los resultados de un modelado numérico, porque hay control del comportamiento de las fronteras y del volumen de control. Con este contexto, los modelos indican que el horno actual puede reconstruirse para mejorar su eficacia como equipo (mantiene su integridad estructural, aún a temperaturas altas) y su eficiencia energética relativa a la energía entregada a la pieza por tratar. Estas definiciones especiales permitieron cuantificar una mejora potencial de un 131% (incremento de resistencia térmica de las paredes) y una mejora en el ámbito de 4,96% a 53,06% de mejor aprovechamiento de la temperatura interior para tratar la pieza.

- Se pudo observar que mejorar el flujo de aire interno dentro de la cavidad del horno logra mejorar la eficiencia energética del horno ya se disminuye la resistencia por convección de la pieza. En este caso se tomó el ventilador con el que cuenta actualmente el equipo pero se diseñó un deflector que se encarga que redirigir el flujo de aire hacia la pieza que se encuentra en calentamiento logrando que el aire que circula en el interior del horno pase por los bloques de resistencias para que el aire se caliente y luego debido a los deflectores y convectores diseñados este mismo aire choque contra la pieza.
- El cálculo de pérdidas por puentes térmicos puede en un principio considerarse innecesario o irrelevante, sin embargo, este debe realizarse y, posteriormente, decidir si es un valor a considerar o no como influyente en las pérdidas de calor totales del sistema. Para el proyecto desarrollado el material que actúa como una derivación (*bypass*) en las paredes, techo y puerta del horno fue el acero corrugado de las varillas. Según un proceso de cálculo validado externamente, se determinó que no representaban una fuente significativa de pérdidas de calor. Existen en el mercado materiales que ayudan a contrarrestar el efecto de los puentes térmicos, no obstante, en su gran mayoría son materiales para utilizar en ventanas o paredes de edificios, donde las temperaturas no alcanzan valores tan elevados como en el horno. Adicionalmente, la varilla de acero estructural como método de sujeción es difícil de reemplazar, y la magnitud del calor que transportan no lo justifica.
- Al no contar con una manera fiable de cuantificar el flujo de aire que circula por el interior del horno con el abanico actual, se decide realizar una simulación en donde se analiza el efecto que tendría en la pieza un aumento porcentual de los coeficientes de convección. Como se presentan varios escenarios, los resultados hipotéticos son un buen indicador del impacto relativo; el caso es que una vez que las resistencias eléctricas han llegado a su máxima temperatura de operación, una mejora en la razón de calor de entrada a la pieza ocurrirá sólo si se aumenta su coeficiente de convección superficial promedio.
- Respecto al estudio de los materiales que se utilizaron para el diseño de la bandeja, se ideó la utilización de un enrejado hecho de acero revestido de ladrillo aislante, con la característica de que la bandeja pudiera soportar los pesos de las piezas que se deben de tratar, y también soportar posibles impactos o roces de las piezas en la operación normal de traslado de estas. La proyección de la bandeja pretende que su movilización sea sobre el canal hecho para tales fines.
- Se calculó la eficiencia energética del horno con la propuesta de diseño y se comprendió su importancia en los tiempos de producción de los procesos de alivio de tensiones. Las propuestas de mejora representan menores tiempos y mejores resultados, contrario a las condiciones actuales donde no se llega a la temperatura deseada inclusive operando por doce horas o más de tiempo, con las mejoras no solamente la temperatura deseada puede alcanzarse, sino que también el tiempo para llegar al valor es considerablemente menor que el actual.

- Para llevar a cabo el análisis completo de transferencia de calor del horno es preciso ser bastante minuciosos, hay que prestar atención cuando llega el momento de seleccionar las variables utilizadas para el proceso y así obtener resultados realistas. A pesar que en la realidad generalmente existen divergencias con los cálculos teóricos en la mayoría de las situaciones o problemas de ingeniería, lo esperado es que estas diferencias sean lo menor posibles y puedan ser asociadas a uno o varios factores, y no que queden atribuidas al azar.

7 Recomendaciones

- El taller Anonos debe de invertir en realizar un estudio para poder determinar el proceso de revenido más ajustado a las necesidades específicas del proceso de alivio de tensiones para acero inoxidable de la familia 400 y que se ajuste al nuevo diseño propuesto en este trabajo, ya que actualmente el proceso no tiene bien definido la manera de elevar la temperatura de operación.
- El código de programación MATLAB usado en este trabajo se puede modificar para generar resultados nuevos siempre y cuando sean en estudio de los mismos parámetros que se reflejan en los resultados, por tanto, el código fuente puede ser usado para comprobar distintas formas de operar el horno si se requiera y de esta manera simular condiciones hipotéticas para observar cómo cambia su desempeño. Sin embargo, es imprescindible que los cambios en el programa y la interpretación de los resultados se encuentra a cargo de personal con preparación y experiencia profesional comparable a los autores de este trabajo.
- Para la instalación del refractario, a pesar de que se establecen parámetros de trabajo y posicionamiento en general de cada uno de los ladrillos para que esa configuración específica no presente problemas en cuanto a la dilatación normal del acero, es importante contar con personal capacitado que conozca del proceso de construcción y colocación de los ladrillos. Una correcta ejecución de la construcción garantiza que el aislamiento sea cercano o mejor al que se consideró en los modelos numéricos usados en este trabajo.
- Si se elige aumentar la potencia nominal del banco de resistencias, debe considerarse que el mayor consumo de energía será una condición de operación segura únicamente si se acondiciona al efecto la acometida y sistema de distribución eléctrica. La configuración actual no es capaz de soportar el banco de 86,5kW que se propone.
- Para poder instalar la estructura de movilización de la compuerta se debe de trasladar el horno hacia adelante aproximadamente dos metros con el fin que no haya interferencia con ningún otro sistema eléctrico o mecánico propio del taller.
- Se debe de tener registros de todos los mantenimientos preventivos hechos en el horno, esto con el fin de aumentar la vida útil de este y así poder lograr disminuciones en la cantidad de mantenimientos correctivos. Aspectos como las resistencias, el ventilador y en el nuevo diseño, la condición de los ladrillos refractarios son críticos y de suma importancia en la estabilidad del funcionamiento correcto del horno para alivio de tensiones post soldadura.

8 Bibliografía

- Álvarez, F. B. (2006). Hornos Industriales. Universidad de Oviedo, España.
- Álvarez, F. B. (s.f.). Refractarios-Tema 1- Los Materiales Refractarios. Universidad de Oviedo, España.
- ASM International. (1992). *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. United States of America: ASM International.
- ASM International. (1991). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*. United States of America: ASM International.
- ASM International. (2007). Tempering. En J. D. Verhoeven, *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist* (pág. 99 a 104). Estados Unidos de América: ASM International.
- Catells, X. E. (2011). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Díaz de Santos.
- CCI Control de Calidad. (s.f.). *CCI Control de Calidad*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2014, de Tenso-corrosión: <http://www.cci-calidad.com/articulos2657.htm>
- Cengel, Y. A. (2006). *Transferencia de Calory Masa*. McGraw Hill.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). Sitios de Cimentación. En C. F. Rica, *Código Sísmico de Costa Rica* (pág. 2/6). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Colegio Federados de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- CubaEduca. (s.f.). *CubaEduca Portal Educativo Cubano*. Recuperado el 7 de Febrero de 2014, de Medición de temperatura : <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2453.pdf>
- DCC Corporation. *HotMux Application Manual*. Pennsauken, NJ: DCC Corporation.
- Energy Efficiency Guide for Industry in Asia. (2006). Thermal Energy Equipment: Furnaces and Refractories.
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. (s.f.). Temperatura y Dilatación Térmica. Sevilla, Espana.
- Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional. (s.f.). Tratamiento Térmico de los Aceros Inoxidables.
- GRUPO GH. (s.f.). *Forjar e formar*. Recuperado el 7 de Agosto de 2013, de GH Induction: <http://www.ghinduction.com/process/forjar-e-formar/?lang=pt-br>
- Instituto Valenciano de la Edificación. (s.f.). Propiedades de Aislantes Térmicos para Rehabilitación Energética.

- Istrati, G. (1961). *Manual de los Aceros Inoxidables*. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.
- Jeffus, L. (2009). *Soldadura Principios y Aplicaciones*. España: Paraninfo S.A.
- Mandado, E., Jorge, A., Celso, F., & José, A. (2009). *Automatas Programables y Sistemas de Automatización*. Marcombo, S.A.
- Ordóñez, D. S. (s.f.). *Técnicas Experimentales en Metalurgia*. Universidad de Santiago de Chile.
- Rockis, G. J., & Glen, M. A. (2005). *Electrical Motor Controls*. American Technical Publishers, INC.
- Thermal Ceramics. (2009). *Ladrillos Aislantes K*. Morgan Crucible.
- Tipperary Energy Agency. (2011). Calculation of U-Value. Construction with Thermal Bridging. Tipperary, Irlanda. Obtenido de Tipperary Energy Agency.
- Universidad de Costa Rica. (s.f.). *Red Sismológica Nacional*. Recuperado el 14 de Mayo de 2013, de RSN UCR-ICE Red Sismológica Nacional: <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/en/not/436-25-01-13-por-que-tiembra-tanto-en-costa-rica>
- Universidad de Oviedo. (2006). Hornos Industriales.
- Zamora, M. A. (Setiembre de 2012). Gerente General MAZ Industrial. (J. C. Berrocal, & F. J. Chinchilla, Entrevistadores

9 ANEXOS

9.1 Cuadros utilizados para el cálculo de la carga sísmica de la estructura de soporte del tecele.

Cuadro 9. 1 Cargas temporales unitarias mínimas.

Destino del piso	Carga temporal (kg/m²)
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares.	200
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250
Escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de libre acceso al público.	400
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, etc.	500
Bibliotecas y salones de archivo.	500
Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con peso intermedio.	650
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800
Techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros.	40
Azoteas con pendiente superior al 5 por ciento.	100
Azoteas con pendiente inferior o igual al 5 por ciento.	200
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	300
Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente)	300

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010

Cuadro 9. 2 Zonas sísmicas según provincias, cantones y distritos

Cantón	Distrito	Zona
1. San José	Todos	III
2. Escazú	Todos	III
3. Desamparados	Todos	III
4. Puriscal	1. Santiago, Mercedes Sur, Barbaças, Grifo Alto, San Rafael, Candelaria, Desamparados, San Antonio, Chires	III
5. Tarrazú	Todos	III
6. Aserrí	Todos	III
7. Mora	Todos	III
8. Goicoechea	Todos	III
9. Santa Ana	Todos	III
10. Alajuelita	Todos	III
11. Vázquez de Coronado	Todos	III
12. Acosta	Todos	III
13. Tibás	Todos	III
14. Moravia	Todos	III
15. Montes de Oca	Todos	III
16. Turribares	1. San Pablo, San Pedro, San Juan de Mata, San Luis, Carara	III
17. Dota	Todos	III
18. Curridabat	Todos	III
19. Pérez Zeledón	1. San Isidro del General, Daniel Flores, Platanares Barú, Pejibaye General, Rivas, San Pedro, Cajón, Río Nuevo, Páramo	IV III
20. León Cortés Castro	Todos	III

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010)

Cuadro 9. 3 Aceleración pico efectiva de diseño aef para un período de retorno de 475 años y para diferentes zonas sísmicas y tipos de sitio.

Tipo de sitio	Zona II	Zona III	Zona IV
S1	0.20	0.30	0.40
S2	0.24	0.33	0.40
S3	0.28	0.36	0.44
S4	0.34	0.36	0.36

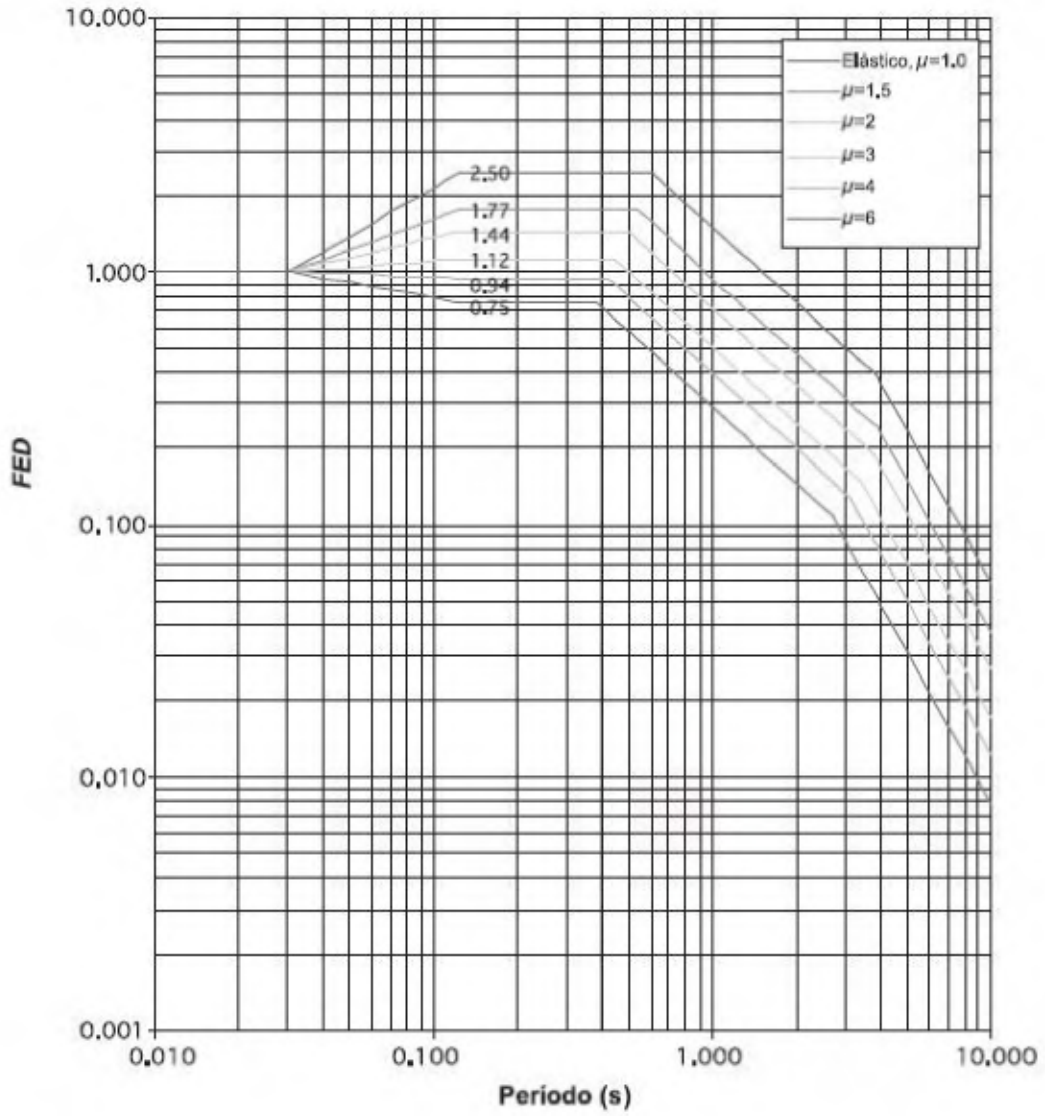
Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Cuadro 9. 4 Clasificación de edificaciones según importancia.

A	Edificaciones e instalaciones esenciales	Hospitales e instalaciones que poseen áreas de cirugía o atención de emergencias. Estaciones de policía y bomberos. Garajes y refugios para vehículos o aviones utilizados para emergencias. Instalaciones y refugios en centros de preparación para emergencias. Terminales aeroportuarias y torres de control aéreo. Edificaciones y equipo en centros de telecomunicaciones y otras instalaciones requeridas para responder a una emergencia. Generadores de emergencia para instalaciones pertenecientes al grupo A. Tanques de almacenamiento de agua que sean esenciales. Estructuras que contienen bombas u otros materiales o equipo para suprimir el fuego	1.25	1.5
Grupo	Descripción	Ocupación o función de la edificación	Factor I	Factor Ip
B	Edificaciones e instalaciones riesgosas	Obras e instalaciones utilizadas para la producción, almacenamiento y trasiego de sustancias o químicos tóxicos o explosivos. Obras que contienen o soportan sustancias tóxicas o explosivas. Obras cuya falla pueda poner en peligro otras edificaciones de los grupos A y B.	1.25	1.5
C	Edificaciones de ocupación especial	Edificaciones para actividades educativas con una capacidad mayor que 300 estudiantes. Edificios para centros de salud con 50 o más pacientes residentes, pero no incluidas en el grupo A. Todas las edificaciones con una ocupación mayor que 5000 personas no incluidas en los grupos A o B. Edificaciones y equipo en estaciones de generación de energía y otras instalaciones públicas no incluidas en el grupo A y requeridas para mantener operación continua.	1.00	1.25
D	Edificaciones de ocupación normal	Todas las obras de habitación, oficinas, comercio o industria y cualquier otra edificación no especificada en los grupos A, B C o E.	1.00	1.25
Grupo	Descripción	Ocupación o función de la edificación	Factor I	Factor Ip
E	Edificaciones misceláneas	Construcción agrícola y edificios de baja ocupación. Galpones y naves de almacenamiento de materiales no tóxicos y de baja ocupación. Tapias y muros de colindancia. Obras e instalaciones provisionales para la construcción.	0.75	1.00

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010

Cuadro 9. 5 Factor espectral dinámico, FED, para sitios de cimentación tipo S3 en zona sísmica III (amortiguamiento $\zeta = 5\%$; ductilidades $\mu = 1, 1.5, 2, 3, 4, 6$).



Fuente: Código Sísmico de Costa Rica 2010.

9.2 Ilustraciones de los momentos flexionantes debidos a la carga temporal y por la carga sísmica tanto para el eje X como para el eje Y

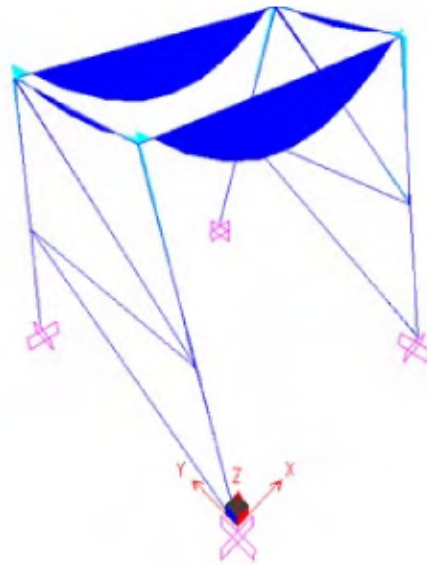


Ilustración 9. 1 Diagrama de momentos por carga temporal CT

Fuente: Los Autores, 2013

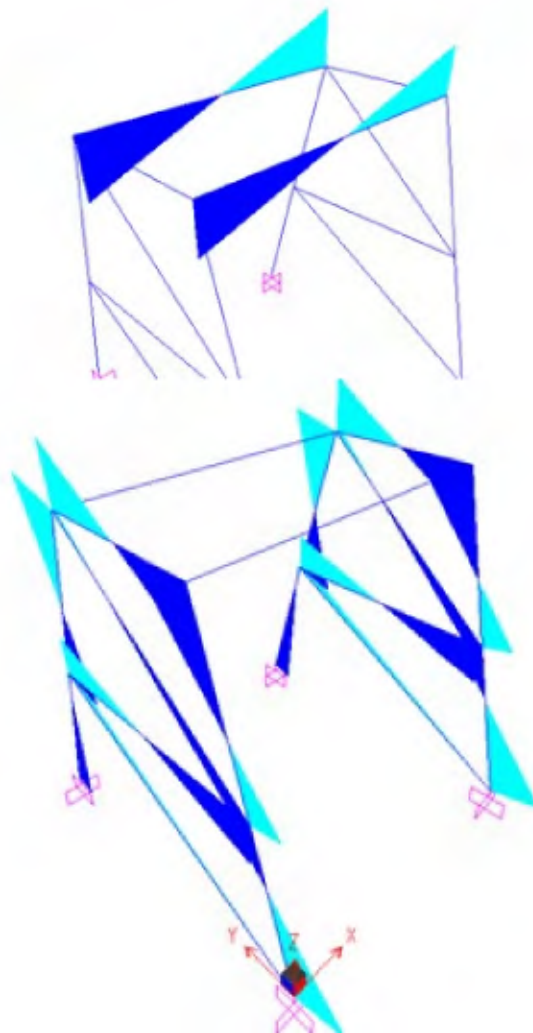


Ilustración 9. 2
por carga sísmica.

Fuente: Los Autores,

Diagrama de momentos
Sentido eje X

2013

Ilustración 9. 3 Diagrama de momentos por carga sísmica. Sentido eje Y

Fuente: Los Autores, 2013

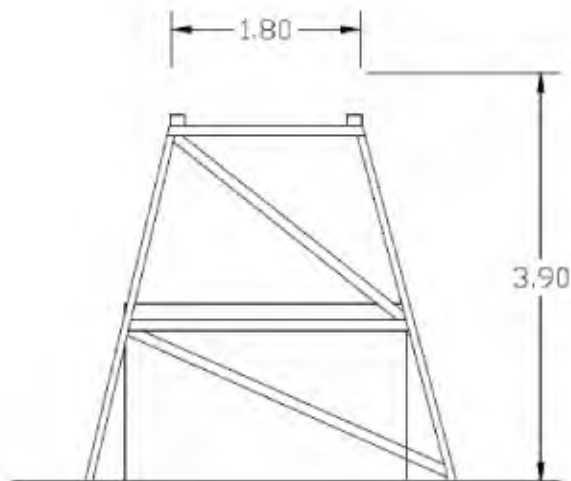


Ilustración 9. 4 Vista lateral de la estructura del sistema de movilización de la compuerta del horno.

Fuente: Los Autores, 2013.

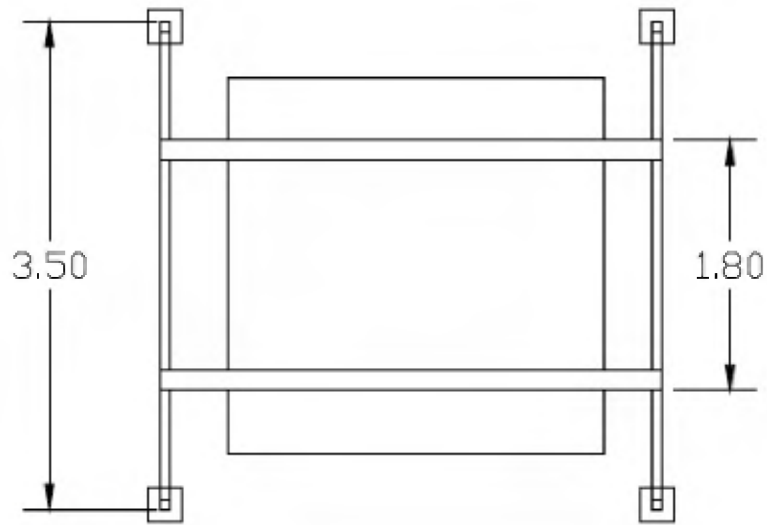


Ilustración 9.5 Vista superior de la estructura del sistema de movilización de la compuerta del horno

Fuente : Los Autores, 2013

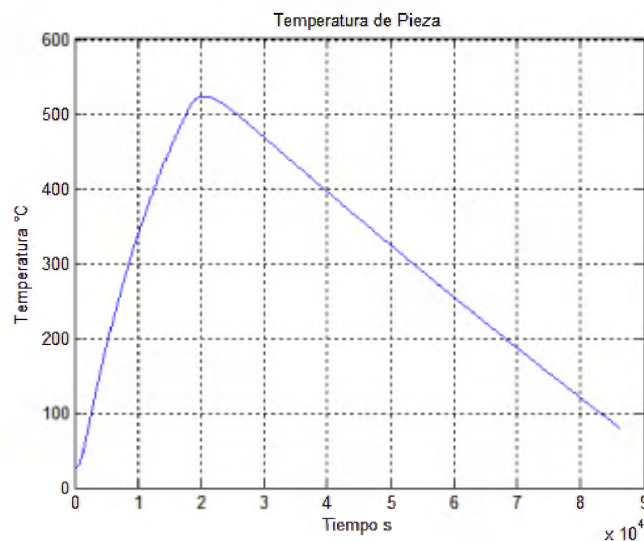
9.3 Análisis sobre el ciclo de enfriamiento dadas las condiciones propuestas.

Debido a que el horno mantiene mejor el calor dentro de su volumen de trabajo, se realiza un análisis para determinar que no hay problemas en el ciclo de enfriamiento ya que al poseer alta resistividad ante la pérdida de calor se tardaría más tiempo en enfriar el espacio, y por ende la pieza. Este análisis realizado en el mismo sistema virtual de modelado, determina que si se mantiene una operación de calentamiento de al menos 6 horas y una operación de enfriamiento de 16 horas, utilizando el abanico para desplazar el aire interno y además abriendo la puerta del horno cuando la temperatura sea aceptable para el ser humano; se tiene un enfriamiento completo de la pieza llegando a los 70 grados centígrados.

Es importante destacar que tenemos un proceso mucho más completo que permite llegar a temperaturas de pieza deseadas por el costo de aproximadamente 2 horas más de enfriamiento; tomando en cuenta que siempre que se desee se puede utilizar el modelo virtual para simular modificaciones en la estructura del horno según sea necesario, ya sea, en la resistividad del horno, en componentes de movimiento de aire, entre otros; logrando un mejor equilibrio entre los valores deseados de calentamiento, enfriamiento y duración del proceso.

Estos cálculos fueron realizados en situaciones máximas de trabajo donde la pieza tiene un peso de 2500kg, por tanto para piezas de menor masa la situación se mejora de forma proporcional.

Anexo 9.3.1 Modelado de ciclo de calentamiento y enfriamiento para que la pieza se pueda extraer del horno.



Fuente: Los Autores, 2013.

10 APENDICES

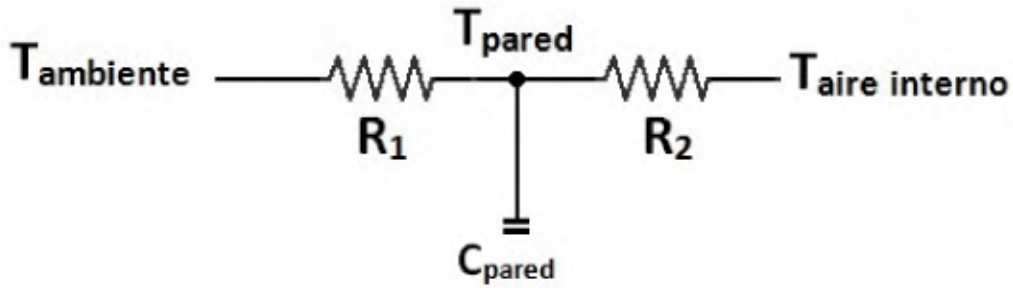


Ilustración
10.70
Diagrama
para código
Matlab de
pared de
horno sin

ladrillos aislantes refractarios

Fuente: Los Autores, 2013

Donde:

- $R_1 = \text{Resistencia de convección} + \text{Resistencia de conducción externa} .$

$$\left(\frac{1}{HC_{ex} \cdot A_{ext}} \right) + \left(\frac{L_{1020}}{k_{1020} \cdot A_{1020}} + \frac{L_{aislante}}{(k_{aislante} \cdot A_{aislante})} \right)$$

- $R_2 = \text{Resistencia de conducción} + \text{Resistencia de convección interna} .$

$$\left(\frac{L_{aislante}}{(k_{aislante} \cdot A_{aislante})} + \frac{L_{inox}}{k_{inox} \cdot A_{inox}} \right) + \dot{i}$$

- $C_{pared} = (Masa_{pared} \cdot Calor\ específico_{pared}) \cdot 5$

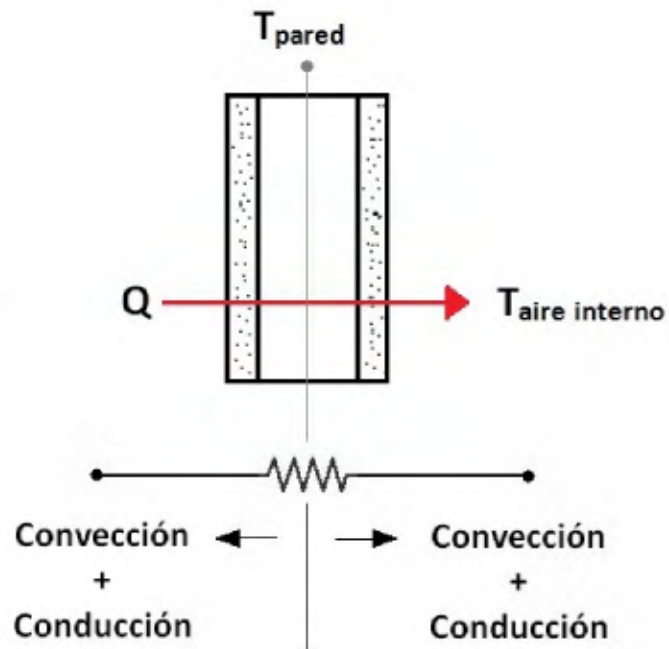


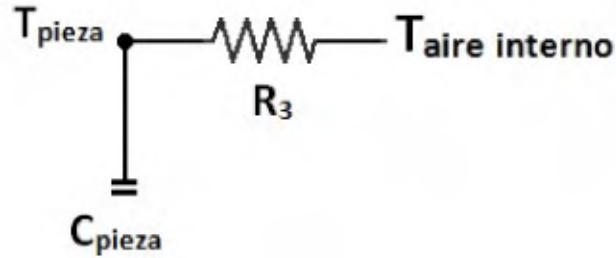
Ilustración 10.71 Ilustración de la pared del horno y el sentido de transferencia de calor, sin ladrillos aislantes refractarios.

Fuente: Los Autores, 2013.

- Ecuación utilizada en código Matlab, derivada de las imágenes anteriores:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p} \cdot \left(\frac{T_{amb}}{R_1} + \frac{T_{aire}}{R_2} - \frac{T_{pared}}{R_1} - \frac{T_{pared}}{R_2} \right)$$

10.1 Diagrama para código Matlab para la pieza a ser tratada térmicamente.



Donde,

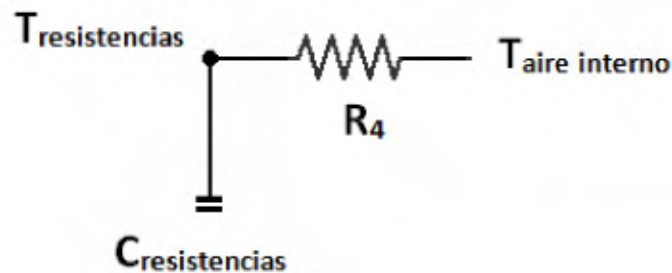
- $R_3 = \text{Resistencia de conducción interna} + \text{Resistencia de convección de la pieza al aire}$

$$\left(\frac{1}{HC_{pieza} \cdot A_{pieza}} \right) + \left(\frac{L_{pieza}}{k_{pieza} \cdot A_{pieza}} \right)$$

- $C_{pieza} = \text{Masa}_{pieza} \cdot \text{Calor específico}_{pieza}$
-
- Ecuación utilizada en código Matlab, derivada del diagrama anterior:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{pieza}} \left(\frac{T_{aire}}{R_3} - \frac{T_{pieza}}{R_3} \right)$$

10.2 Diagramas para código Matlab de las resistencias colocadas en el horno.



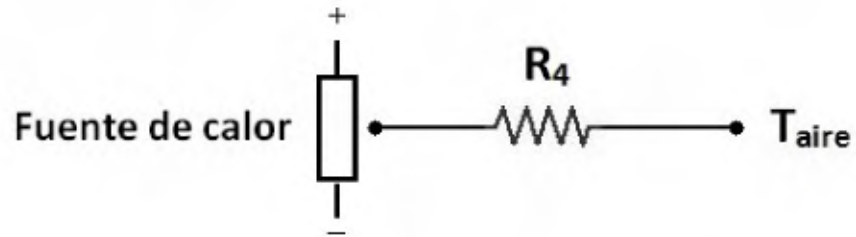


Ilustración 10.72 Diagramas de las resistencias colocadas en el horno

Fuente: Los Autores, 2013

Donde,

$R_4 = \text{Resistencia de conducción de la resistencia} + \text{Resistencia de convección hacia el aire}.$

$$R_4 = \left(\frac{1}{HC_{resistencia} \cdot A_{resistencia}} \right) + \left(\frac{L_{resistencia}}{k_{resistencia} \cdot A_{resistencia}} \right)$$

$$C_{resistencias} = \text{Masa}_{resistencias} \cdot \text{Calor específico}_{resistencias}$$

- Ecuación utilizada en código Matlab, derivada de las imágenes anteriores:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{resistencias}} \left(\frac{T_{aire}}{R_4} - \frac{T_{resistencia}}{R_4} \right)$$

10.3 Diagrama para código Matlab del sistema completo horno + pieza.

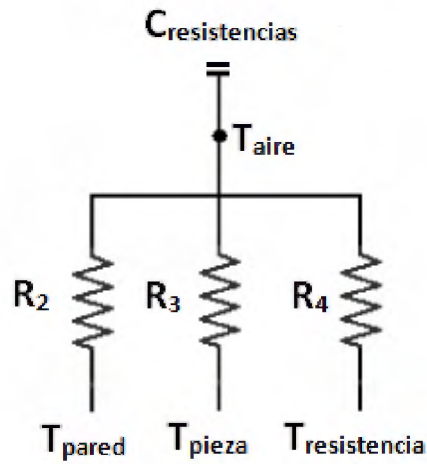


Ilustración 10.73 Diagrama del sistema completo horno + pieza.

Fuente: Los Autores, 2013

- Ecuación utilizada en código Matlab, derivada del diagrama anterior:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{resistencias}} \cdot \left(\frac{T_{pared}}{R_2} + \frac{T_{pieza}}{R_3} + \frac{T_{resistencia}}{R_4} - \frac{T_{aire}}{R_2} - \frac{T_{aire}}{R_3} - \frac{T_{aire}}{R_4} \right)$$

10.4 Diagrama para código Matlab del piso del horno

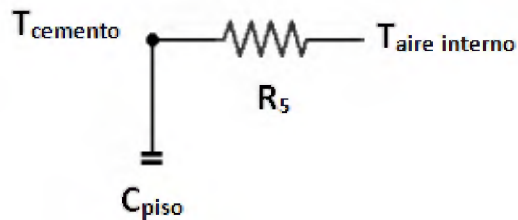


Ilustración 10.74 Diagrama para el piso del horno

Fuente: Los Autores, 2013

Donde:

- $R_5 = R_{\text{piso}} + \text{Resistencia de convección del piso al aire}$

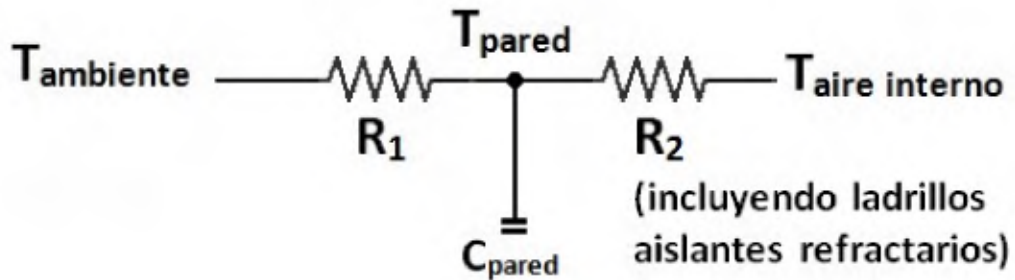
$$\left(\frac{L_{\text{inox-piso}}}{k_{\text{inox-piso}} \cdot A_{\text{inox-piso}}} + \frac{L_{\text{cemento}}}{k_{\text{cemento}} \cdot A_{\text{cemento}}} \right) + \left(\frac{1}{\text{Coeficiente de convección del aire} \cdot A_{\text{interna}}} \right)$$

- $C_{\text{piso}} = \text{Masa}_{\text{piso}} \cdot \text{Calor específico}_{\text{piso}}$

Ecuación utilizada en el código Matlab, derivada del diagrama anterior.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{\text{piso}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{aire}}}{R_5} - \frac{T_{\text{cemento}}}{R_5} \right)$$

10.5 Diagrama para código Matlab de pared del horno con ladrillos aislantes refractarios



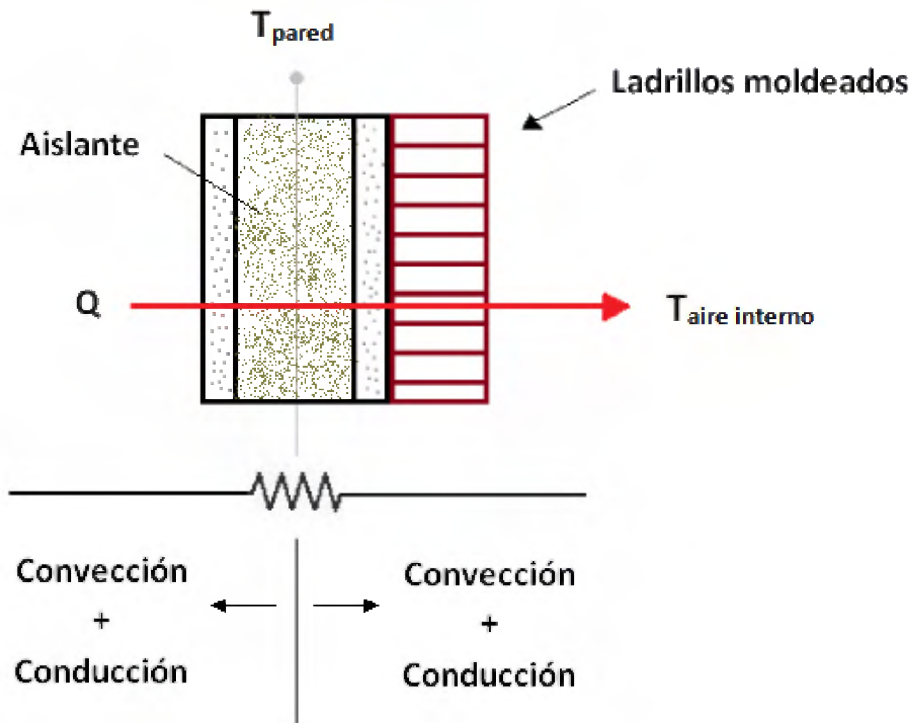


Ilustración 10.75 Diagrama de pared del horno con ladrillos aislantes refractarios.

Fuente: Los Autores, 2013.

Donde:

- $R_1 = \text{Resistencia de convección} + \text{Resistencia de conducción externa} .$

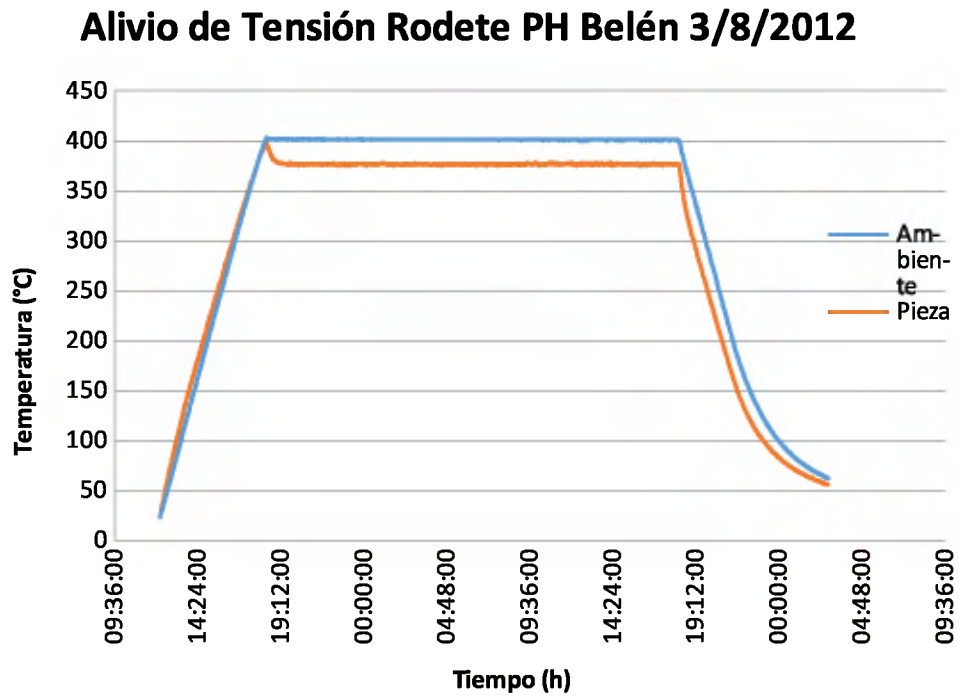
$$\left(\frac{1}{HC_{ex} \cdot A_{ext}} \right) + \left(\frac{L_{1020}}{k_{1020} \cdot A_{1020}} + \frac{L_{aislante}}{(k_{aislante} \cdot A_{aislante})} \right)$$

- $R_2 = \text{Resistencia de conducción} + \text{Resistencia de convección interna} .$

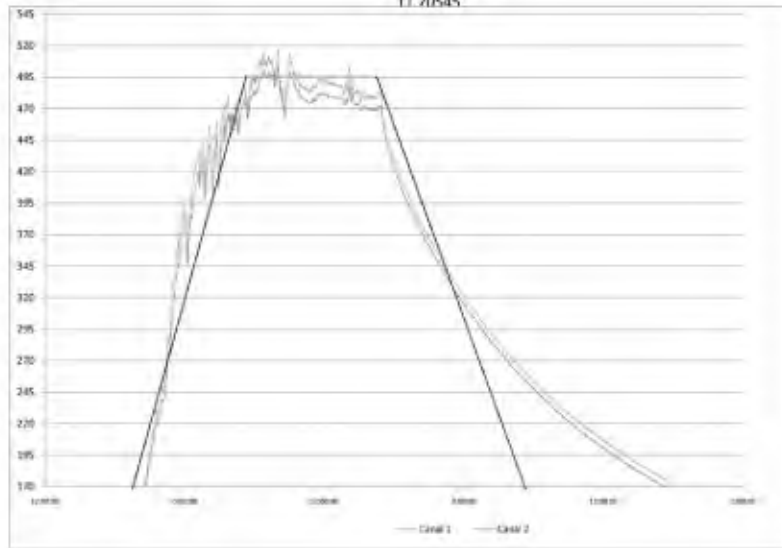
$$\left[\left(\frac{L_{aislante}}{(k_{aislante} \cdot A_{aislante})} + \frac{L_{inox}}{k_{inox} \cdot A_{inox}} \right) + \left(\frac{L_{ladrillo}}{k_{ladrillo} \cdot A_{ladrillo}} \right) \right] + \dot{Q}$$

- $$C_{pared} = \left[(masa_{ladrillo} + masa_{pared}) \cdot (calor\ esp._{pared} \cdot calor\ esp._{ladrillo}) \right] \cdot 5$$

10.6 Cuadros de control térmico utilizados para generar la curva de ajuste en Matlab. (CNFL)



Tratamiento Térmico
Rodete Pelton
TT 70545



10.7 Cotización de ladrillo refractario.

Ladrillos IBF 2300 9"X4½"x2½: 1.800 colones + i. v. (Refractarios La Uruca)

IBF 2300 LI



Product Data

10/09: 0205

Description: 2300°F Insulating Firebrick

Applications: IBF 2300 LI is suited for both backup and hot-face lining duty. Typical applications include ceramic kilns and backup linings in iron channel induction furnaces and sulphur recovery units.

Chemical Analysis: Approximate (Calcined Basis)

Silica (SiO ₂)	44.8%
Alumina (Al ₂ O ₃)	51.0%
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.9%
Titania (TiO ₂)	1.5%
Lime (CaO)	0.4%
Magnesia (MgO)	0.4%
Soda (Na ₂ O)	0.1%
Potash (K ₂ O)	0.9%

Physical Data (Typical)

Maximum Service Temperature	2300°F (1260°C)
Bulk Density	35 lb/ft ³ (0.56 g/cm ³)
Modulus of Rupture	130 lb/in. ² (0.9 MPa)
Cold Crushing Strength	230 lb/in. ² (1.6 MPa)
Thermal Conductivity	Btu-in/hr-ft ² -°F (W/m-°C)
At 500°F (260°C)	1.33 (0.19)
At 1000°F (538°C)	1.67 (0.24)
At 1500°F (816°C)	2.11 (0.30)
At 2000°F (1093°C)	2.64 (0.38)

Note: The test data shown are based on average results on production samples and are subject to normal variation on individual tests. The test data cannot be taken as minimum or maximum values for specification purposes. ASTM test procedures used when applicable.

10.8 Código Matlab utilizado para la condicion actual del horno.

Archivorunhorno.m

```
clear;

clc;

[T,Y]=ode23('homoret',[0:0.01:3600*8],[25 25 25 25 25]);

figure(1);

plot (T,Y(:,5));

title('Temperatura del cemento');

ylabel('Temperatura °C');

xlabel('Tiempo s');

grid;

figure(2);

plot (T,Y(:,1));

title('Temperatura de Pared');

ylabel('Temperatura °C');

xlabel('Tiempo s');

grid;

figure(3);

plot (T,Y(:,2));

title('Temperatura de Pieza');

ylabel('Temperatura °C');

xlabel('Tiempo s');

grid;

figure(4);

plot (T,Y(:,3));

title('Temperatura de Aire');
```

```

ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;
figure(5);
plot (T,Y(:,4));
title('Temperatura de Resistencias');
ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;

```

Archivohornoret.m

```

function[dzdt]=hornoret(t,z)
%Definicion de constantes
    %Dimensiones del horno
alto=1.73;      %altura interna del horno (m)
ancho=2.70;     %ancho interno del horno (m)
Prof=2.70;     %profundidad interna del horno (m)
Vol=alto*ancho*Prof; %volumen interno del horno (m^2)

    %Constantes de la Pieza
Mpie=2500;     %Masa de la pieza (kg)
Cpie=460;     %Calor especifico del acero inoxidable de la pieza (j/kg*K)
Kpie=21;      %Coeficiente conductividad termica del acero inox 410(W/m*K)
R=392.5e-3;   %Radio generatriz (m)
r=300e-3;     %Radio interno que genera el toroide (m)
Apie=4*pi()^2*R*r; %Area transversal de la pieza (m^2)

```

Lpie=340e-3; %Espesor de la pieza (m)
p=8030; %Densidad del acero inoxidable de la pieza (kg/m³)

%Constantes del aire dentro del horno

Te=673; %Temperatura del aire circundante del horno (K)
Ti=296; %Temperatura inicial del proceso (K)
Pr=101; %Presion a la cual se encuentra el horno (Kpa)
R=0.287; %Constante del aire (Kpa*m³/Kg*K)
Mair=(Pr*Vol)/(R*Ti); %Masadel aire interno delhorno (Kg)
Cair=1007; %Calor especifico del aire a temperatura inicial (J/kg*K)

%Constantes del aire en el exterior del horno

Tamb=296; %Temperatura del ambiente K

%Constantes de la pared del horno

Mpar=264; %Masa pared del horno (kg)
Cpar=473; %Calor especifico de la pared (j/kg*K)

%Lamina de acero 1020 externa del horno

K1020=50; %Coeficiente conductividad termica del acero 1020(W/m*K)
L1020=0.003175; %Espesor lamina pared externa (m)
A1020=4.671; %Area de la pared externa(m²)
Aext=A1020;

%Lamina de aislante insulquick dentro de las placas de la pared

Lais=0.127; %Espesor aislante pared externa (m)
Kais=0.035; %Coeficiente conductividad termica del aislante insulquick(W/m*K)
Aais=4.671; %Area del aisolante pared externa(m²)

%Lamina de acero inoxidable interna de la pared del horno

$L_{inox}=0.003175$; %Espesor lamina pared interna (m)

$K_{inox}=15$; %Coeficiente conductividad termica del acero inoxidable 304(W/m*K)

$A_{inox}=4.671$; %Area de la pared interna acero inoxidable(m²)

$A_{int}=A_{inox}$;

%Lamina de acero inoxidable del piso del horno

$L_{inoxF}=0.00635$; %Espesor lamina pared interna (m)

$K_{inoxF}=16.3$; %Coeficiente conductividad termica del acero inoxidable 304(W/m*K)

$A_{inoxF}=4.671$; %Area de la pared interna acero inoxidable(m²)

$V_{inoxF}=L_{inoxF}*A_{inoxF}$; %Volumen del acero inoxidable (m³)

$D_{inoxF}=7930$; %Densidad del acero inoxidable 304 (Kg/m³)

$M_{inoxF}=V_{inoxF}*D_{inoxF}$; %Masa del acero inoxidable (Kg)

$C_{inoxF}=500$; %Calor especifico del acero Inoxidable (j/kg*K)

%Compuesto de Hormigon del piso del horno

$L_{cem}=0.127$; %Espesor de cemento(m)

$K_{cem}=1.4$; %Coeficiente conductividad termica del cemento(W/m*K)

$A_{cem}=4.671$; %Area transversal de cemento(m²)

$D_{cem}=2400$; %Densidad del cemento (Kg/m³)

$V_{olcem}=A_{cem}*L_{cem}$; %Volumen del cemento (m³)

$M_{cem}=V_{olcem}*D_{cem}$; %Masa del cemento (Kg)

$C_{cem}=840$; %Calor especifico del cemento (j/kg*K)

%Constantes totales del piso

Mflo=Mcem+MinoxF;

Cflo=(CinoxF+Ccem)/2;

%Constantes de lasResistencias

Mres=50; %Asumiendo 50 kg de material

Cres=450; %Calor especifico del nicromo (j/kg*K)

Kres=17.5; %Coeficiente de conductividad del nicromo (W/m*K)

L=36; %Largo de la resistencia en total (m)

Ares=((1/8*25.4)/1000)*2*pi()*L;%Area transversal de las resistencias (m^2)

Lres=(1/8*25.4)/1000; %Espesor de la resistencia (m)

%Coeficientes de conveccion (W/m^2*K)

HCres=20;

HCex=5;

HCin=6;

HCpie=6;

%Resistencias usadas

Rconvex=1/(HCex*Aext);

Rcond1=L1020/(K1020*A1020)+(Lais/(Kais*Aais))/2;

Rcond2=(Lais/(Kais*Aais))/2+Linox/(Kinox*Ainox);

Rconvin=1/(HCin*Aint);

Rconvpie=1/(HCpie*Apie);

$$R_{conpie} = L_{pie} / (K_{pie} * A_{pie});$$

$$R_{convres} = 1 / (H_{Cres} * A_{res});$$

$$R_{conres} = L_{res} / (K_{res} * A_{res});$$

$$R_{Ffloor} = L_{inoxF} / (K_{inoxF} * A_{inoxF}) + L_{cem} / (K_{cem} * A_{cem});$$

%Resistencias equivalentes

$$R_1 = R_{convex} * 5 + R_{cond1} * 5$$

$$R_2 = R_{cond2} * 5 + R_{convin} * 5$$

$$R_3 = R_{convpie} + R_{conpie};$$

$$R_4 = R_{convres} + R_{conres};$$

$$R_5 = R_{Ffloor} + 1 / (H_{Cin} * A_{int})$$

$$R_{test} = R_1 + R_2 + R_5$$

%Capacitancias equivalentes

$$C_{pared} = M_{par} * C_{par} * 5$$

$$C_{pieza} = M_{pie} * C_{pie}$$

$$C_{aire} = M_{air} * C_{air}$$

$$C_{resistencias} = M_{res} * C_{res}$$

$$C_{Ffloor} = M_{flo} * C_{flo}$$

%perdidas adicionales (W)

$$q_{ad} = 0.156 * 1000;$$

%ecuaciones diferenciales

$$\%z(1) = T_{par} \text{ (temperatura de pared)}$$

$$\%Z(2) = T_{pie} \text{ (temperatura de pieza)}$$

$$\%z(3) = T_{air} \text{ (temperatura de aire)}$$

%z(4)=Tres (temperatura de las resistencias)

%z(5)=Tcem (temperatura del cemento)

if t<=3600 && z(3)<100

qr=57.64e3;

else

qr=0;

end

if 3600<t<=3600*2 && z(3)<200

qr=57.64e3;

else

qr=0;

end

if 3600*2<t<=3600*3 && z(3)<300

qr=57.64e3;

else

qr=0;

end

if 3600*3<t<=3600*4 && z(3)<400

qr=57.64e3;

else

qr=0;

end

if 3600*4<t<=3600*5 && z(3)<500

qr=57.64e3;

else

```

qr=0;
end
if 3600*5<t<=3600*6 && z(3)<600

```

```

qr=57.64e3;
else

```

```

qr=0;
end

```

```

if 3600*6<t<=3600*7 && z(3)<700

```

```

qr=57.64e3;
else

```

```

qr=0;
end

```

```

if 3600*7<t<=3600*8 && z(3)<800

```

```

qr=57.64e3;
else

```

```

qr=0;
end

```

```

dzdt(1)=(1/(Cpared))*(Tamb/R1+z(3)/R2-(1/R1+1/R2)*z(1));

```

```

dzdt(2)=(1/(Cpieza))*(z(3)/R3-z(2)/R3);

```

```

dzdt(3)=(1/(Caire))*(-(z(3)/R2+z(3)/R3+z(3)/R4+z(3)/R5)+z(1)/R2+z(2)/R3+z(4)/R4+z(5)/R5-
qad);

```

```

dzdt(4)=(1/(Cresistencias))*(-z(4)/R4+z(3)/R4+qr);

```

```

dzdt(5)=(1/(CFloor))*(z(3)/R5-z(5)/R5);

```

```

dzdt=dzdt';

```


10.9 Código Matlab utilizado para la condicion de diseño propuesto del horno.

Archivorunrefrac.m

```
clear;
clc;
[T,Y]=ode23('homorefrac',[0:0.01:3600*8],[25 25 25 25 25]);
figure(1);
plot (T,Y(:,5));
title('Temperatura del cemento');
ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;
figure(2);
plot (T,Y(:,1));
title('Temperatura de Pared');
ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;
figure(3);
plot (T,Y(:,2));
title('Temperatura de Pieza');
ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;
figure(4);
plot (T,Y(:,3));
title('Temperatura de Aire');
```

```

ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;
figure(5);
plot (T,Y(:,4));
title('Temperatura de Resistencias');
ylabel('Temperatura °C');
xlabel('Tiempo s');
grid;

```

Archivohornorefrac.m

```

function[dzdt]=hornorefrac(t,z)
%Definicion de constantes
    %Dimensiones del horno
alto=1.73;      %altura interna del horno (m)
ancho=2.70;    %ancho interno del horno (m)
Prof=2.70;    %profundidad interna del horno (m)
Vol=alto*ancho*Prof;  %volumen interno del horno (m^2)

    %Constantes de la Pieza
Mpie=2500;    %Masa de la pieza (kg)
Cpie=460;    %Calor especifico del acero inoxidable de la pieza (j/kg*K)
Kpie=21;    %Coeficiente conductividad termica del acero inox 410(W/m*K)
R=392.5e-3;  %Radio generatriz (m)
r=300e-3;    %Radio interno que genera el toroide (m)
Apie=4*pi()^2*R*r;  %Area transversal de la pieza (m^2)
Lpie=340e-3;  %Espesor de la pieza (m)

```

$p=8030$; %Densidad del acero inoxidable de la pieza (kg/m^3)

$\%R_c=1/k$; %Resistencia termica de la pieza ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)

%Constantes del aire dentro del horno

$T_e=673$; %Temperatura del aire circundante del horno (K)

$T_i=296$; %Temperatura inicial del proceso (K)

$P_r=101$; %Presion a la cual se encuentra el horno (Kpa)

$R=0.287$; %Constante del aire ($\text{Kpa}\cdot\text{m}^3/\text{Kg}\cdot\text{K}$)

$M_{air}=(P_r\cdot\text{Vol})/(R\cdot T_i)$; %Masadel aire interno delhorno (Kg)

$C_{air}=1007$; %Calor especifico del aire a temperatura inicial ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

%Constantes del aire en el exterior del horno

$T_{amb}=296$; %Temperatura del ambiente K

%Constantes de la pared del horno

$M_{par}=264$; %Masa pared del horno (kg)

$C_{par}=473$; %Calor especifico de la pared ($\text{j}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

%Lamina de acero 1020 externa del horno

$K_{1020}=50$; %Coeficiente conductividad termica del acero 1020($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

$L_{1020}=0.003175$; %Espesor lamina pared externa (m)

$A_{1020}=4.671$; %Area de la pared externa(m^2)

$A_{ext}=A_{1020}$;

%Lamina de aislante insulquick dentro de las placas de la pared

$L_{ais}=0.127$; %Espesor aislante pared externa (m)

$K_{ais}=0.035$; %Coeficiente conductividad termica del aislante insulquick($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

Aais=4.671; %Area del aislante pared externa(m²)

%Lamina de acero inoxidable interna de la pared del horno

Linox=0.003175; %Espesor lamina pared interna (m)

Kinox=15; %Coeficiente conductividad termica del acero inoxidable 304(W/m*K)

Ainox=4.671; %Area de la pared interna acero inoxidable(m²)

Aint=Ainox;

%Lamina de acero inoxidable del piso del horno

LinoxF=0.00635; %Espesor lamina pared interna (m)

KinoxF=16.3; %Coeficiente conductividad termica del acero inoxidable 304(W/m*K)

AinoxF=4.671; %Area de la pared interna acero inoxidable(m²)

VinoxF=LinoxF*AinoxF; %Volumen del acero inoxidable (m³)

DinoxF=7930; %Densidad del acero inoxidable 304 (Kg/m³)

MinoxF=VinoxF*DinoxF; %Masa del acero inoxidable (Kg)

CinoxF=500; %Calor especifico del acero Inoxidable (j/kg*K)

%Compuesto de Hormigon del piso del horno

Lcem=0.127*2; %Espesor de cemento(m)(10inches)

Kcem=1.4; %Coeficiente conductividad termica del cemento(W/m*K)

Acem=4.671; %Area transversal de cemento(m²)

Dcem=2400; %Densidad del cemento (Kg/m³)

Volcem=Acem*Lcem;%Volumendelcemento (m³)

Mcem=Volcem*Dcem;%Masadelcemento (Kg)

Ccem=840; %Calor especifico delcemento (j/kg*K)

%Constantes totalesdel piso

$$M_{\text{flo}}=M_{\text{cem}}+M_{\text{inoxF}};$$

$$C_{\text{flo}}=(C_{\text{inoxF}}+C_{\text{cem}})/2;$$

%Constantes de las Resistencias

$$M_{\text{res}}=75; \quad \% \text{Asumiendo 100 kg de material}$$

$$C_{\text{res}}=450; \quad \% \text{Calor especifico del nicromo (j/kg*K)}$$

$$K_{\text{res}}=17.5; \quad \% \text{Coeficiente de conductividad del nicromo (W/m*K)}$$

$$L=36*1.5; \quad \% \text{Largo de la resistencia en total (m)}$$

$$A_{\text{res}}=((1/8*25.4)/1000)*2*\pi()*L; \% \text{Area transversal de las resistencias (m}^2\text{)}$$

$$L_{\text{res}}=(1/8*25.4)/1000; \quad \% \text{Espesor de la resistencia (m)}$$

%Constantes del refractario

$$M_{\text{lad}}=235; \quad \% \text{Masa de los ladrillos refractarios en una pared (Kg)}$$

$$D_{\text{lad}}=465; \quad \% \text{Densidad del ladrillo refractario (kg/m}^3\text{)}.$$

$$C_{\text{lad}}=2500/D_{\text{lad}}; \quad \% \text{Calor especifico del refractario (j/kg*K)}$$

$$K_{\text{lad}}=0.17; \quad \% \text{Coeficiente de conductividad del refractario (W/m*K)}$$

$$A_{\text{lad}}=A_{\text{int}}; \quad \% \text{Area transversal del refractario (m}^2\text{)}$$

$$L_{\text{lad}}=22e-2; \quad \% \text{Espesor del refractario (m)}$$

%Coeficientes de conveccion (W/m²*K)

$$H_{\text{Cres}}=20;$$

$$H_{\text{Cex}}=5;$$

$$H_{\text{Cin}}=1;$$

$$H_{\text{Cpie}}=18;$$

%Resistencias usadas

$$R_{\text{convex}}=1/(H_{\text{Cex}}*A_{\text{ext}});$$

$$R_{cond1} = L_{1020} / (K_{1020} * A_{1020}) + (L_{ais} / (K_{ais} * A_{ais})) / 2;$$

$$R_{cond2} = (L_{ais} / (K_{ais} * A_{ais})) / 2 + L_{inox} / (K_{inox} * A_{inox}) + L_{lad} / (K_{lad} * A_{lad});$$

$$R_{convin} = 1 / (H_{Cin} * A_{int});$$

$$R_{convpie} = 1 / (H_{Cpie} * A_{pie});$$

$$R_{conpie} = L_{pie} / (K_{pie} * A_{pie});$$

$$R_{convres} = 1 / (H_{Cres} * A_{res});$$

$$R_{conres} = L_{res} / (K_{res} * A_{res});$$

$$R_{Floor} = L_{inoxF} / (K_{inoxF} * A_{inoxF}) + L_{cem} / (K_{cem} * A_{cem}) + 11e-2 / (K_{lad} * A_{lad});$$

%Resistencias equivalentes

$$R_1 = R_{convex} * 5 + R_{cond1} * 5$$

$$R_2 = R_{cond2} * 5 + R_{convin} * 5$$

$$R_3 = R_{convpie} + R_{conpie};$$

$$R_4 = R_{convres} + R_{conres};$$

$$R_5 = R_{Floor} + 1 / (H_{Cin} * A_{int})$$

$$R_{test} = R_1 + R_2 + R_5$$

%Capacitancias equivalentes

$$C_{pared} = ((M_{lad} + M_{par}) * (C_{par} + C_{lad})) * 5$$

$$C_{pieza} = M_{pie} * C_{pie}$$

$$C_{aire} = M_{air} * C_{air}$$

$$C_{resistencias} = M_{res} * C_{res}$$

$$C_{Floor} = (M_{flo} + M_{lad}) * (C_{flo} + C_{lad})$$

%ecuaciones diferenciales

%z(1)=Tpar (temperatura de pared)

%Z(2)=Tpie (temperatura de pieza)

%z(3)=Tair (temperatura de aire)

%z(4)=Tres (temperatura de las resistencias)

%z(5)=Tcem (temperatura del cemento)

if t<=3600 && z(3)<100

qr=100.8e3;

else

qr=0;

end

if 3600<t<=3600*2 && z(3)<200

qr=100.8e3;

else

qr=0;

end

if 3600*2<t<=3600*3 && z(3)<300

qr=100.8e3;

else

qr=0;

end

if 3600*3<t<=3600*4 && z(3)<400

qr=100.8e3;

else

```

qr=0;
end
if 3600*4<t<=3600*5 && z(3)<500
qr=100.8e3;
else
qr=0;
end
if 3600*5<t<=3600*6 && z(3)<600
qr=100.8e3;
else
qr=0;
end
if 3600*6<t<=3600*7 && z(3)<700
qr=100.8e3;
else
qr=0;
end
if 3600*7<t<=3600*8 && z(3)<800
qr=100.8e3;
else
qr=0;
end

dzdt(1)=(1/(Cpared))*(Tamb/R1+z(3)/R2-(1/R1+1/R2)*z(1));
dzdt(2)=(1/(Cpieza))*(z(3)/R3-z(2)/R3);
dzdt(3)=(1/(Caire))*(-(z(3)/R2+z(3)/R3+z(3)/R4+z(3)/R5)+z(1)/R2+z(2)/R3+z(4)/R4+z(5)/R5);

```


$$dzdt(4)=(1/(Cresistencias))*(-z(4)/R4+z(3)/R4+qr);$$

$$dzdt(5)=(1/(CFloor))*(z(3)/R5-z(5)/R5);$$

$$dzdt=dzdt';$$