



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUÍMICA
E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGIA Y
MATERIALES.

“PROPUESTA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
UN HORNO DE REVENIDO DE BAJA TEMPERATURA
(HASTA 300°C) PARA EL RELEVADO DE ESFUERZOS”.

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

PRESENTA:
GUSTAVO GABRIEL GÓMEZ VARGAS.

DIRECTOR DE TESIS:
M. EN C. JESUS SALVADOR MEZA ESPINOZA



MAYO 2015

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Agradezco infinitamente a mis señores padres Gregorio y Gabriela por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Ustedes han sido mi soporte y motor en todo momento de mi vida personal y académica, gracias por apoyarme y enderezar mi andar cuando por momentos me perdí, por los sacrificios realizados y tantas noches de desvelos y preocupación. Esto también es un logro de ustedes.

A mis hermanos Jessica e Irvin Brandon por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar, por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A Bonnie, por ser parte muy importante de mi vida, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, sobre todo por su paciencia y amor incondicional.

Gracias Dr. Roberto Zaragoza Mosqueda por creer en mí, haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi tesis profesional en Moly-Cop México S.A. de C.V. y por el apoyo y facilidades que me fueron entregadas en la empresa. Por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y aprender cosas nuevas.

Muy especialmente agradezco al Ma. en C. Edgar Ballon Medina por su dirección, confianza, enseñanza, disponibilidad y dedicación de tiempo. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y ayudarme a concluir este proyecto.

Al Ma. en C. Luis Alfredo Lozano Ledesma y al Ingeniero Javier Aguayo Gómez por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis. Y sobre todo su amistad.

Gracias al Ma. en C. Jesús Salvador Meza Espinoza por su apoyo y confianza en mi trabajo, por su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN):
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE).
Por abrirme sus puertas y permitirme formar académica y profesionalmente.

"La Técnica al Servicio de la Patria".

¡Muchas Gracias!

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	VII
I. FUNDAMENTOS TEORICOS	1
1.1. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	1
1.1.1. CONDUCCIÓN	1
1.1.2. CONVECCIÓN.....	3
1.1.2.1. COEFICIENTE DE CONVECCIÓN	4
1.1.1.1. ANALISIS DIMENSIONAL. NÚMEROS ADIMENSIONALES.....	5
1.1.2.3. NUMERO DE REYNOLDS.....	6
1.1.2.4. FLUJO EN MEDIOS POROSOS.....	7
1.1.2.5. NÚMERO DE PRANDTL.....	8
1.1.2.6. NÚMERO DE NUSSELT.....	9
1.1.2.7. NUMERO DE BIOT.....	9
1.1.2.8. EFECTO DE LA VEL. DE AIRE EN EL CALENTAMIENTO.....	10
1.1.2.9. CAPA LÍMITE DE VELOCIDAD	10
1.1.3. TIEMPO DE CALENTAMIENTO.....	11
1.1.4. RADIACIÓN	12
II. HORNOS	13
2.1. TIPOS DE HORNOS INDUSTRIALES.....	13
2.1.1. ENERGÍA PARA CALENTAMIENTO EN HORNO.....	15
2.2. VENTILADOR.....	15
2.2.1. LEYES DE LOS VENTILADORES.....	16
2.2.2. VENTILADORES CENTRÍFUGOS.....	18
2.2.3. ECUACIONES.....	21
III. TRATAMIENTOS TÉRMICOS	21
3.1. TIPOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS	21
3.1.1. REVENIDO.....	22
3.1.2. TIPOS DE REVENIDO.....	23

3.2. MATERIALES REFRACTARIOS QUE PUEDEN SER UTILIZADOS COMO AISLANTES TÉRMICOS.....	25
3.2.1. FIBRA CERÁMICA.....	25
3.2.2. FIBRA DE VIDRIO.....	25
3.2.3. TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO MÁS USADOS COMÚNMENTE	26
3.2.4. LAMINA DE ACERO COLD ROLL.	26
IV. QUEMADORES.....	27
4.1. TIPOS DE QUEMADORES.....	27
4.1.1. QUEMADORES PARA LÍQUIDOS.....	27
4.1.2. QUEMADORES DE VAPORIZACIÓN O GASIFICACIÓN.	27
4.1.3. QUEMADORES DE EMULSIÓN.....	28
4.1.4. QUEMADORES DE PULVERIZACIÓN POR FLUIDO AUXILIAR.	28
4.1.5. QUEMADOR DE PULVERIZACIÓN MECÁNICA CENTRÍFUGO O DE COPA ROTATIVA.....	28
4.1.6. TIPOS DE QUEMADORES Y CAPACIDADES.....	30
V. DISEÑO.....	31
5.1. CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE UN HONRO DE REVENIDO DE BAJA TEMPERATURA	31
5.2. DISEÑO PROPUESTO.....	31
5.2.1. PAUTAS PARA EL DISEÑO DEL HORNO DE REVENIDO DE BAJA TEMPERATURA SEGÚN LOS REQUERIMIENTOS.....	31
5.3. CALCULO DE LA CANTIDAD DE FLUJO VOLUMÉTRICO PARA LLEVAR A CABO LA CONVECCIÓN FORZADA DENTRO DEL HORNO.....	32
5.3.1. VOLUMEN DE AIRE DESPLAZADO POR EL VENTILADOR.....	32
5.3.2. VENTILADOR CENTRIFUGO.....	33
5.3.3. VISTA SUPERIOR DEL HORNO.....	33
5.3.4. FLUJO VOLUMÉTRICO DESPLAZADO POR LOS VENTILADORES DE AIRE DENTRO DEL HORNO	33
5.4. REQUERIMIENTOS DE VELOCIDAD DE AIRE DENTRO DEL HORNO. .	34
5.4.1. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE AIRE SOBRE EL PRODUCTO.....	35
5.5. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES CONVECTIVOS PRESENTES EN LA CONVECCIÓN FORZADA.....	35

5.5.1.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS.....	36
5.5.2.	DETERMINACIÓN DE LOS NÚMEROS DE NUSSELT R Y NUSSELT TR.....	36
5.5.3.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.....	37
5.5.4.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE BIOT	37
5.5.5.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO.....	37
VI.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	38
6.1.	MATERIALES ELEGIDOS PARA EL DISEÑO DEL HORNO DE REVENIDO DE BAJA TEMPERATURA.	38
6.1.1.	CÁLCULO SE CARGA TÉRMICA.	40
6.1.2.	CALCULO PARA EL FLUJO DE CALOR QUE SE PIERDE EN LAS PAREDES DEL HORNO.	40
6.1.3.	CALCULO PARA EL FLUJO DE CALOR QUE SE PIERDE EN EL TECHO DEL HORNO.....	41
6.1.4.	CALCULO PARA EL FLUJO DE CALOR QUE SE PIERDE EN EL PISO DEL HORNO.....	41
6.1.5.	CALCULO PARA EL FLUJO DE CALOR QUE SE PIERDE EN LA PUERTA DE ENTRADA Y SALIDA DEL HORNO.....	42
6.1.6.	FLUJO DE CALOR QUE SE PIERDE POR TODAS LAS PAREDES DEL HORNO.	43
6.2.	FLUJO DE CALOR QUE ABSORBE LA CARGA.	43
6.3.	FLUJO DE CALOR TOTAL QUE ABSORBE EL HORNO.	44
6.4.	CALOR DE RESERVA QUE GENERAN LOS QUEMADORES.	44
6.5.	EFICIENCIA DEL HORNO.....	44
VII.	HORNO DE REVENIDO.....	45
7.1.	PLANOS DEL HORNO	45
VIII.	SIMULADOR HRG-1.....	46
8.1.	SIMULADOR DE PARÁMETROS Y COEFICIENTES CONVECTIVOS DEL HORNO DE REVENIDO.....	46
8.1.1.	PRIMER APARTADO.....	46
8.1.2.	SEGUNDO APARTADO.....	47
8.1.3.	TERCER APARTADO.....	48
8.1.4.	CUARTO APARTADO.....	49

8.1.5. QUINTO APARTADO.....	50
8.1.6. SEXTO APARTADO.....	51
8.1.7. SÉPTIMO APARTADO.....	52
CONCLUSIONES.	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de transferencia de calor	1
Figura 2 Convección libre o natural.....	3
Figura 3 Convección forzada.....	3
Figura 4. Capa límite de la velocidad.	11
Figura 5. Variación del diámetro.....	17
Figura 6. Álabes curvados hacia adelante, radiales y hacia atrás.....	18
Figura 7. Ventiladores centrífugos con álabes curvados.....	18
Figura 8. Curva característica	20
Figura 9. Caudal de los diferentes ventiladores.	20
Figura 10. Representación del quemador.	28
Figura 11. Diseño propuesto	32
Figura 12. Ventilador centrifugo tipo rodete de alta presión.....	33
Figura 13. Vista superior del horno.	33
Figura 14. Tipos de Placas.....	34
Figura 15. Placa base seleccionada que sostiene el producto.....	35
Figura 16. Partición de muros y techo.....	39
Figura 17. Plano de la estructura del horno.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Coeficientes de convección para distintos casos.	5
Tabla II. Coeficientes de fricción o roce de diversos materiales.	7
Tabla III. Diversos valores del número de Prandtl.	8
Tabla IV. Variables de un ventilador.	16
Tabla V. Intervalos de temperaturas para revenido de aceros.	24
Tabla VI. Tipos de quemadores y capacidades.	30
Tabla VII. Tipos de materiales térmicos.	39
Tabla VIII. Coeficiente global de transmisión de calor.	40
Tabla IX. Características del quemador.	44
Tabla X. Cálculo del caudal para cada ventilador.	46
Tabla XI. Velocidad del aire sobre el producto.	47
Tabla XII. Convección forzada.	48
Tabla XIII. Materiales empleados para la fabricación del horno.	49
Tabla XIV. Capacidad de proceso.	50
Tabla XV. Características del horno.	51
Tabla XVI. Calor absorbido y de reserva.	52

RESUMEN.

El objetivo general del proyecto es plantear los parámetros metalúrgicos necesarios para la fabricación de un horno de revenido de baja temperatura por un proceso de convección forzada.

La realización del diseño implica el cálculo de la cantidad de caudal de aire suministrado por la ventilación, a partir de este cálculo se puede deducir la velocidad con que se debe suministrar el aire, se debe proporcionar para la realización óptima de la transferencia de calor, por medio de la convección forzada en un sistema cerrado.

Utilizando una serie de correlaciones y ecuaciones se determina los diferentes coeficientes implícitos que se presenta en la transferencia de calor por convección forzada y masa, hacia o desde una superficie en un flujo externo.

Una vez encontrados los coeficientes convectivos se procede a calcular las posibles pérdidas de calor generadas en el horno, ya sea por paredes del horno, puertas, calor absorbido por la carga, etc.

El tiempo de calentamiento se dedujo a partir de la ecuación de Heisler para una esfera, los tiempos de la pieza se calcularon asumiendo una transferencia tridimensional.

Los materiales utilizados en la estructuración del horno son sugeridos a base de una gama de materiales normalmente utilizados. Los quemadores y el soplador los emplearemos por catálogo de fabricante y de acuerdo a la necesidad de calor que se requiere suministrar considerando las pérdidas. Queriendo decir con esto, el fundamento de este estudio radica en su mayor parte en el estudio de transferencia de calor por convección.

Una vez fabricado el horno, se le pueden reajustar las variables como caudales de gas natural y aire, la temperatura de la llama, los tiempos de calentamientos, etc, además debe realizarse luego una curva de calentamiento y una de calibración del horno.

INTRODUCCIÓN

Al estar cumpliendo una estancia profesional en Moly-Cop México S.A. de C.V. se encontraron oportunidades de mejora en el proceso de dicha empresa. Por lo cual nos dimos a la tarea de establecer los parámetros metalúrgicos para diseñar una propuesta de un horno de revenido de baja temperatura para el relevado de esfuerzo. El horno con el que cuenta la compañía es de resistencias eléctricas y su tamaño para este fin está restringido, de aquí surge la necesidad de la fabricación de un horno de revenido de mayor capacidad que el existente en la empresa. Se desea que este horno funcione con gas natural debido a su economía.

Dada la importancia y la necesidad del empleo de un nuevo horno de revenido de baja temperatura para el relevado de esfuerzos, que permita realizar el tratamiento térmico al producto, y que no se vea limitado por la capacidad. Tenemos además que tomar en cuenta que este horno debe de poseer una mejor tecnología que admita un mejor control del proceso y una mejor calidad en el producto fabricado.

Así mismo este horno permitirá reducir los costos operacionales y energéticos. Dentro de los alcances se espera que con el diseño propuesto se logre alcanzar las condiciones requeridas para el tratamiento térmico de revenido en el producto

La idea en general es establecer un tipo de simulador que nos permita hacer un horno de relevado de tensiones o en su efecto poder optimizar cualquier horno industrial teniendo en cuenta los conceptos metalúrgicos de transferencia de calor por convección forzada. En nuestra revisión bibliográfica, vemos que hay una falta de claridad al tratar de poder establecer los parámetros adecuados para poder realizar un diseño de hornos metalúrgicos para el relevado de tensiones de baja temperatura con los cálculos necesarios que nos permita visualizar cada factor o parámetro a tener en cuenta.

El planteamiento de este trabajo es presentar en forma esquemática los factores a tener en consideración para poder realizar un diseño adecuado que sirva de base para posibles trabajos, que puedan profundizar en optimizar los datos experimentales que facilitaran la elaboración.

Es de gran importancia el revenido en el producto ya que con este tratamiento térmico en general los fines que se consiguen son los siguientes: mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad, disminuir las tensiones internas de transformación que se originan en el temple. Modifica las características mecánicas en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos: disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza. Aumentar las características de ductilidad y las de tenacidad

I. FUNDAMENTOS TEORICOS.

1.1. Transferencia de calor.

Transferencia de calor, es un proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente². En la figura 1 se esquematiza estos tipos de transferencia de calor.

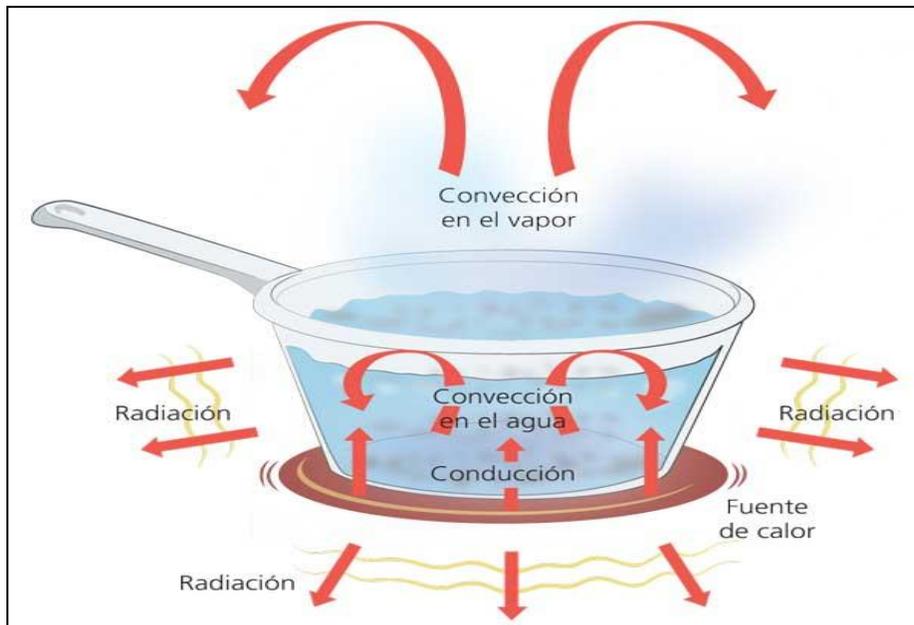


Figura 1. Tipos de transferencia de calor

1.1.1. Conducción.

La conducción, es la transferencia de energía entre las partículas adjuntas de una sustancia de mayor a menos energía. La conducción es debido a la colisión y difusión de las moléculas durante un movimiento aleatorio. En los sólidos se produce por la combinación de las moléculas y la energía de transporte de los electrones libres.³

Como ejemplo; Se tiene una barra metálica con un extremo a 80°C y otro a temperatura ambiente, si no se tiene ninguna otra influencia externa y el extremo caliente se mantiene a 80°C, habrá una transferencia de calor por conducción desde el extremo caliente hacia el frío incrementando la temperatura de este último.

El coeficiente de conducción térmica que pasa a través de un medio depende de su geometría, del espesor del material y del medio, así como la diferencia de temperatura que exista en el medio.³

Existen materiales como el oro, plata y cobre, que poseen una conductividad térmica elevada y conducen perfectamente el calor. Mientras que hay materiales cerámicos como el vidrio que tienen conductividades mucho menores, incluso conducen muy mal el calor y en algunos casos se usan como aislantes.³

En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción de calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas.²

El coeficiente de conducción térmica a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de la capa y el área, pero es inversamente proporcional al espesor de la capa, lo cual se enuncia de la siguiente manera³:

$$Q_{cond} = kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde la constante de proporcionalidad k se denomina **conductividad térmica** del material y está dada en $W/m^{\circ}C$ la cual representa la habilidad del material para conducir el calor. En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial de³

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (2)$$

La cual es llamada la **ley de Fourier de la conducción del calor**. Esta relación indica que el coeficiente de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx) en esa dirección. El calor es conducido en la dirección de menor temperatura y el gradiente se convierte negativo cuando la temperatura decrece con el incremento de x . Así que, el signo negativo es añadido para hacer positiva la transferencia de calor en la dirección de x , y siempre es normal al área y también depende del material.⁴

1.1.2. Convección.

Cuando un fluido a T_F se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_{pF} el proceso de intercambio de energía térmica se denomina **convección**.⁵ Existen dos tipos de convección:

- a) Libre o natural,
- b) Forzada.

La **convección libre o natural**, se caracteriza porque se produce a través del desplazamiento de partículas entre regiones con diferentes densidades, el movimiento del flujo es generado por la existencia de gradientes de temperatura. La convección natural o convección libre se distingue de la convección forzada, porque en esta última el movimiento convectivo se debe a agentes externos.⁵

Ejemplos típicos son;

- La transmisión de calor al exterior, desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento.⁵
- El calor transferido, desde la superficie de un colector solar en un día en calma.⁵ En la figura 2 se esquematiza la convección libre o natural.

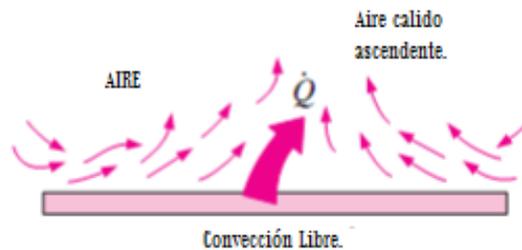


Figura 2 Convección libre o natural

La **convección forzada** tiene lugar cuando una fuerza motriz mueve un fluido con una velocidad (u_F) sobre una superficie que se encuentra a una temperatura (T_{pF}), mayor o menor que la del fluido (T_F). Como la velocidad del fluido en la convección forzada (u_F) es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.⁵ En la figura 3 se esquematiza la convección forzada.

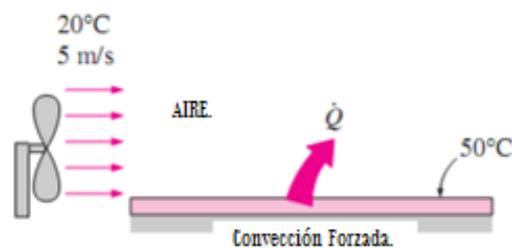


Figura 3 Convección forzada

En convección forzada se pueden alcanzar flujos calóricos superiores a los que se da en convección natural. Independientemente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida Q_{cond} se puede escribir (Ley de Newton):

$$Q_{cond} = h A (T_{pF} - T_F) \quad (3)$$

En la que:

- h = es la conductancia convectiva térmica unitaria o coeficiente de transmisión del calor por convección en la interface líquido-sólido, en $W/m^2 \cdot K$
- A = es el área superficial en contacto con el fluido, en m^2
- T_{pF} = es la temperatura de la superficie
- T_F = es la temperatura del fluido no perturbado

La ecuación anterior sirve como definición del coeficiente de convección h ; su valor numérico se tiene que determinar analíticamente o experimentalmente.⁵

1.1.2.1. Coeficiente de convección.

La constante de proporcionalidad “h” se denomina coeficiente de transferencia por convección. Esta constante de proporcionalidad depende de varios factores:

1. Que la pared sea plana o curva
2. Que sea horizontal, inclinada ó vertical
3. Que el fluido en contacto sea un gas ó un líquido.
4. La densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica del fluido.
5. Las características del flujo del fluido (régimen laminar ó turbulento).
6. Si tiene lugar evaporación, condensación ó no hay cambio de fase.

El **coeficiente de convección**, cuantifica la influencia de las propiedades del fluido de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección, y es representado por la siguiente ecuación⁸.

$$h = Nu_D * \frac{k}{D} \quad (4)$$

Donde:

- h = coeficiente de convección, $W/m^2 \cdot K$
- k = conductividad térmica del material, $W/m \cdot K$
- D = diámetro de la esfera, m .

El valor de “h” es mayor, cuando mayor es la turbulencia en el fluido, que a su vez es mayor cuando mayor es la velocidad y /o cuando menor es la viscosidad. En el caso de muy bajas velocidades o altas viscosidades se puede alcanzar un grado de turbulencia despreciable y el flujo se denomina “laminar”. A altas velocidades, existe un mezclado trasversal, que tiende a homogeneizar las propiedades del fluido (velocidades, temperaturas, etc.). Si está en presencia de un flujo turbulento.

Se presenta a continuación, las bases de la obtención de los coeficientes de transferencias por convección: h. (no se considerará el caso de cambio de fase, para estas situaciones existen también correlaciones para su obtención).

A continuación en la tabla I, a efectos de tener una idea de magnitud, se presenta una lista de ordenes de valor de los coeficientes h para distintos casos:

Tabla I. Coeficientes de convección para distintos casos.

Caso	$h(\text{kcalm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{C}^{-1})$	$h(\text{BTU}\cdot\text{ft}^{-2} \text{h}^{-1}\text{F}^{-1})$
Convección natural: gases	3-20	1-4
Convección natural: líquidos	100-600	20-120
Convección de agua	1000-20000	200- 4000
Convección forzada: gases	10- 100	2-20
Convección forzada: flúidos viscosos	50- 500	10- 100
Convección forzada: agua	500- 10.000	100 - 2.000
Condensación de vapores	4000- 100.000	200- 20.000

1.1.2.2. Análisis dimensional. Números adimensionales.

La transferencia de energía por convección es un fenómeno complicado en donde participan un gran número de efectos, no hay suficiente información para permitir la formulación, ya sea de las ecuaciones diferenciales que lo gobiernan, ó de una noción clara y completa del fenómeno al cual se le puedan aplicar leyes fundamentales. El análisis debe ser experimental y la correlación de las observaciones será un acercamiento empírico a la ecuación que describa correctamente el proceso.⁸

Una herramienta que es utilizada es el análisis dimensional, esta metodología permite obtener una relación entre un conjunto de ciertos números adimensionales, que de alguna forma, incluyen toda la información necesaria para describir el fenómeno con un cierto rigor (cuanto mayor sea este más información se requiere).⁹

Cada número adimensional es una medida del comportamiento del sistema en cierto aspecto, por ejemplo el número adimensional conocido como número de Reynolds es una medida de la importancia de las fuerzas inerciales frente a las viscosas en un fluido en condiciones dada.⁸

A través de correlaciones, cuya forma matemática es obtenida a través del análisis dimensional, sus factores y exponentes a través de la determinación experimental, se puede describir un fenómeno como la convección, de estas expresiones participan los números adimensionales, que como se mencionó introducen la información que describe la situación.⁹

Como se explicara más adelante las correlaciones que participan en la convección forzada las podemos definir en cuatro números adimensionales:

- 1) Re (número de Reynolds),
- 2) Pr (número de Prandtl),
- 3) Nu (número de Nusselt),
- 4) Bi (numero de Biot).

En el caso de la convección natural las correlaciones incluyen tres números adimensionales:

- 1) Nu (número de Nusselt),
- 2) Pr (número de Prandtl),
- 3) Gr (número de Grashof).

1.1.2.3. Numero de Reynolds

Expresa la relación entre el valor de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un fluido en movimiento. Con esta relación se determina el tipo de flujo que tiene el fluido (laminar o turbulento).

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

(5)

Donde:

- ρ : densidad del fluido
- V : velocidad característica del fluido
- D : diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema
- μ : viscosidad dinámica del fluido
- ν : viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

Altos valores de número de Re implican un flujo turbulento. Las velocidades individuales de las partículas tienen direcciones diversas, no coincidentes con la del escurrimiento, generando un mezclado. Para bajo valores de Re el escurrimiento es laminar, sin mezclado trasversal al mismo.

Para número de Re altos las fuerzas inerciales predominan en las partículas del fluido tiende a moverse en trayectorias rectas aún en lugares donde el fluido globalmente debe cambiar de dirección provocando inestabilidades que generan torbellinos. Las fuerzas viscosas se resisten al desplazamiento macroscópico. Las que predominen inerciales o viscosas por lo tanto determinarán, como se mencionó, el tipo de escurrimiento.

1.1.2.4. Flujo en medios porosos.

En un flujo laminar turbulento se debe considerar un lecho poroso, al que está formado por partículas contiguas que dejan entre ellas, huecos o espacios libres y a través de ellos circula el fluido.

Es de interés aclarar la velocidad lineal real del fluido a través de los huecos del lecho poroso, se puede expresar en función de la velocidad lineal superficial (calculada como velocidad de flujo del fluido por la sección transversal total no obstruida del lecho)⁶. En la tabla II se enuncian los coeficientes de fricción o rozamiento de diferentes materiales.

Tabla II. Coeficientes de fricción o roce de diversos materiales.

Coeficientes de rozamiento		
Material 1	Material 2	μ_s
Madera	Cemento	0.6
Madera	Madera	0.25-0.5
Goma	Cemento	1.0
Teflón	Teflón	0.04
Acero	Acero	0.52-0.80

También el número de Reynolds tiene modificaciones que toman en cuenta las características del roce; en forma análoga hay que correr el coeficiente de fricción.

$$Re = \frac{V * D}{v * \mu}$$

(6)

Donde:

- V = velocidad promedio del fluido, m/s
- D = longitud característica de la geometría, m
- $v = \mu/\rho$ = viscosidad cinemática del fluido, m²/s
- μ = Coeficiente de porosidad o de roce.

Sería deseable saber con el número de Reynolds si el flujo es laminar, translacional, o turbulento, pero este no es el caso en la práctica. Esto es porque la transición de flujo laminar a flujo turbulento también depende el grado de disturbios del flujo por la rugosidad superficial, las vibraciones en la tubería y las fluctuaciones en el flujo⁶.

Bajo las más prácticas condiciones podemos tomar, las transiciones de la siguiente manera:

Flujo laminar: $Re < 1000$
 Flujo translacional: $1000 \leq Re \leq 10000$
 Flujo turbulento: $Re > 10000$

1.1.2.5. Número de Prandtl.

El número de Prandtl es una relación entre la "capacidad" del fluido de transferir cantidad de movimiento y la "capacidad" de transferir su energía. Se obtiene a través del cociente de la difusividad de cantidad de movimiento (μ) (que mide lo primero) y la difusividad térmica ($K / g^* Cp$) (que mide lo segundo).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{Cp * \mu}{k} \quad (7)$$

Como se observa en la tabla III. El número de Prandtl depende de las propiedades del fluido.

Tabla III. Diversos valores del número de Prandtl.

Valores característicos del número de Prandtl	
Metales líquidos	
Sodio	0,011
Mercurio	0,0196
Bismuto	0,0142
Gases	
Aire	0,71
Dióxido de Carbono	0,75
Helio	0,68
Hidrogeno	0,70
Monóxido de Carbono	0,73
Otros líquidos	
Agua	4,6
Fluidos viscosos	
Aceite de Motor	3400
Glicerina	3060

1.1.2.6. Número de Nusselt.

Expresa la relación entre la transferencia de energía por convección y la transferencia que habría únicamente por conducción bajo una dada situación en un fluido.

Esto implica medir el aumento de la transmisión de calor desde una superficie dada por un fluido que discurre por la transferencia de calor por convección, comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Se empleara por lo tanto el número adimensional de Nusselt Promedio (Nu)⁸:

$$Nu_R = 0.664 * Re^{0.5} * Pr^{0.333} \quad (8)$$

Es decir un número de Nusselt alto significa que en la situación en análisis, es predominante la transferencia por convección, en el caso de Nu muy bajos la transferencia por conducción cobra importancia es el caso concreto de los metales líquidos. Dos fluidos con diversas características pero que tienen igual número de Nu presentan similar comportamiento relativas de la transferencia por convección y por conducción.⁹

Se deberá considerar un numero de Nusselt Local debido a que se requiere la introducción del factor de fricción sobre la capa limite laminar con un flujo totalmente turbulento sobre la base análoga del Prandtl.

$$Nu_{TR} = \frac{0.037 * Re^{0.8} * Pr}{1 + 2.443 * Re^{-0.1} (Pr^{0.666} - 1)} \quad (9)$$

Es válido para:

$$5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$$
$$0.6 \leq Pr \leq 2000$$

1.1.2.7. Número de Biot.

El número de Biot en lo que es física se entiende como el flujo de calor desde una esfera caliente que se encuentra sumergida en flujo que lo rodea. Este flujo de calor experimenta dos resistencias: la primera por conducción dentro del metal y la segunda por convección desde la esfera al fluido. Si el número de Biot es inferior a 0.1 para placas planas, a 0.05 para cilindros o a 0.03 en las esferas, implica que la conducción de calor dentro del cuerpo es mucho más rápida que la convección en la superficie de éste. Lo que indica la aplicabilidad del Método del Gradiente Nulo para la resolución de problemas de calor en el transitorio.

La definición del número de Biot se entiende mediante la siguiente fórmula:

$$Bi = h * \left(\frac{L}{k}\right) \quad (10)$$

Donde:

- **h** = es el coeficiente de transferencia de calor en la superficie en W/m²K, conocido como coeficiente de película.
- **L** = es una longitud característica en m, definida generalmente como el volumen del cuerpo dividido por su superficie externa total.
- **k** = es la conductividad térmica del material del cuerpo W/mK.

1.1.2.8. Efecto de la velocidad de aire en el calentamiento.

El efecto del aire en la convección natural o forzada es de suma importancia y esta radica en la forma en que se realiza la transferencia de calor y depende de la intensidad del fluido así como sus propiedades: Viscosidad dinámica (μ), Conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (C_p) así como de la velocidad del fluido (V). También depende la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida y del tipo de flujo del fluido (Laminar o Turbulento). Por lo tanto no es sorprendente que la convección sea el mecanismo más complejo de transferencia de calor al relacionar tantas variables²¹.

De acuerdo a la velocidad del fluido podemos tener diferentes características del mismo, por ejemplo:

- 1) **Fluido no viscoso.** Se desprecia la fricción interna entre las distintas partes del fluido.
- 2) **Flujo estacionario.** La velocidad del fluido en un punto es constante con el tiempo.
- 3) **Fluido incompresible.** La densidad del fluido permanece constante con el tiempo.
- 4) **Flujo irrotacional.** No presenta torbellinos, es decir, no hay momento angular del fluido respecto de cualquier punto.

1.1.2.9. Capa límite de velocidad.

Para comprender el desarrollo de la capa límite de velocidad en un fluido, se debe considerar un fluido consta de capas adyacentes apiladas unas sobre otras y la velocidad de las partículas en la primera capa se vuelve cero debido a la condición de no deslizamiento entre el fluido y la superficie como lo muestra la figura 4.

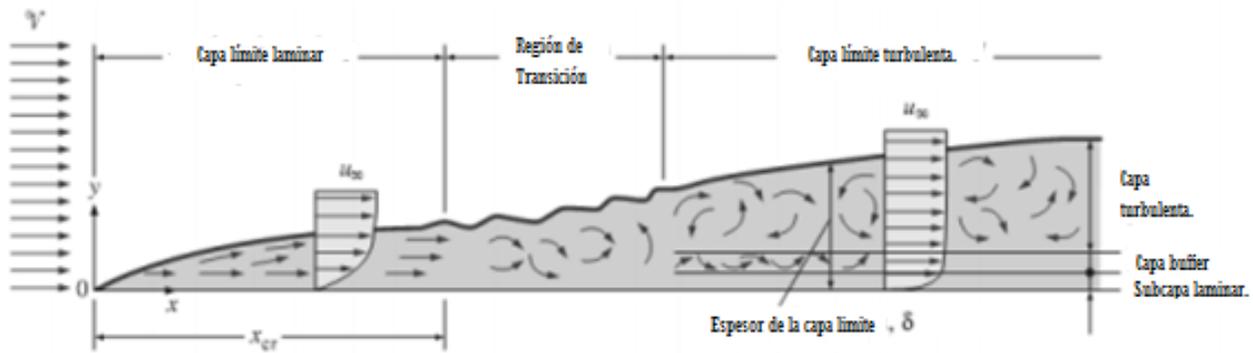


Figura 4. Capa límite de la velocidad.

Esta capa inmóvil retarda las partículas de la capa vecina como resultado de la fricción entre ambas las cuales tienen velocidades diferentes, esta última retarda la capa siguiente y así sucesivamente.

1.1.3. Tiempo de calentamiento.

La temperatura se determina en función del tiempo para la resistencia interna despreciable, esta viene dada por la ecuación de Heisler.

Durante un intervalo de tiempo la temperatura del cuerpo se eleva una cantidad ΔT . El balance de energía del sistema en el intervalo de tiempo Δt se puede expresar como:

- Transferencia de calor hacia el cuerpo durante determinado tiempo es igual al incremento de la energía del cuerpo durante Δt cuya expresión matemática es:

$$t = \frac{\rho * C_p * D}{6 h} \ln \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad (11)$$

Donde:

- t = tiempo requerido para alcanzar la temperatura T .
- ρ = densidad del cuerpo.
- C_p = calor específico del material.
- h = coeficiente de convección del fluido.
- D = diámetro de la esfera o cilindro.
- T = es la temperatura del cuerpo en un tiempo t .
- T_0 = es la temperatura final del cuerpo
- T_{∞} = es la temperatura del fluido.

1.1.4. Radiación

Mientras que la conducción y la convección térmicas tienen lugar sólo a través de un medio material, la radiación térmica puede transportar el calor a través de un fluido o del vacío, en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Existen muchos fenómenos diferentes de radiación electromagnética pero en Ingeniería Térmica sólo consideramos la radiación térmica, es decir, aquella que transporta energía en forma de calor.⁵

La energía que abandona una superficie en forma de calor depende de la temperatura absoluta a que se encuentre y de la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto o cuerpo negro emite cantidad de energía radiante de su superficie Q_r , dada por la ecuación:

$$Q_r = \sigma A T^4 = A E_b \quad (12)$$

Dónde:

E_b : es el poder emisivo del radiador, viniendo expresado el calor radiante Q_r en W , la temperatura T de la superficie en K , y la constante dimensional σ de Stefan-Boltzman en unidades SI, en la forma:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} \quad (13)$$

La ecuación anterior dice que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Aunque la emisión es independiente de las condiciones de los alrededores, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio. Si un cuerpo negro a T_1 (K), irradia calor a un recinto que le rodea completamente y cuya superficie es también negra a T_2 (K), es decir, absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, la transferencia de energía radiante viene dada por:⁵

$$Q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

Si los dos cuerpos negros tienen entre sí una determinada relación geométrica, que se determina mediante un factor de forma F , el calor radiante transferido entre ellos es:

$$Q_r = Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (15)$$

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación con un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emite una fracción constante de la energía que emitirían considerados como cuerpo negro para cada longitud de onda, se llaman cuerpos grises.⁵

II. HORNOS.

Un horno es un aparato cerrado o recinto donde se produce calor por la combustión de un material, por la resistencia de un conductor, o por otras fuentes de calor, utilizado para someter a transformaciones físicas o químicas a los objetos que se introducen en ellos por acción del calor⁹.

2.1. Tipos de hornos industriales.

Los hornos industriales se clasifican según:

1. La transferencia de calor al material.
2. El método en que se inyecta combustible en el horno.
3. El método para manejar el material dentro del horno.}

De acuerdo a la transferencia de calor se dividen en:

- a) **Horno Tipo Estufa:** en estos se transfiere el calor de los productos de combustión del combustible, en contacto directo con el material calentado, por convección y radiación directa de los gases de los gases calientes o por rerradiación de las paredes calientes del horno.
- b) **Horno de Mufla:** aquí el calor es conducido a través de una mufla de metal o refractario, la cual protege ala material calentado del contacto con los gases, y después se transfiere del interior de la mufla, por radiación, al material calentado, que en ocasiones se rodea con gases inertes para impedir su contacto con el aire.
- c) **Hornos con Baños Líquidos:** en los baños líquidos de sales y metálicos se transmite calor a la carga principalmente por conducción. El calor se transmite a las piezas tan rápidamente que esta función no determina la capacidad del horno.

Este tipo de horno incluye a los de revenido a baja temperatura que emplea aceite como medio de calentamiento y los endurecimientos que emplean baños de plomo. De acuerdo al método de inyección de combustible se dividen en:

- 1) **Hornos de Inyección Directa:** se usa cada vez más debido a las mejoras constantes en el diseño y control de los quemadores de gas u otro combustible, en especial para temperaturas superiores a los 650 °C.
- 2) **Hornos de Combustión por Arriba:** los quemadores radiantes queman el combustible a través del techo y están dispuestos en patrones para obtener la mejor distribución de temperatura.
- 3) **Horno de Combustión por Debajo:** es excelente para temperaturas de 400 a 1000 °C, ya que el producto se calienta y está protegido por combustible que se quema. La temperatura y la atmosfera pueden controlarse con precisión, pero la duración de los refractarios impone un límite a la temperatura de alrededor 1000 °C como máximo. En la actualidad se utilizan diseños de tubos radiantes, debido a que se puede controlar mejor la atmosfera del horno y así evitar cualquier contacto de los productos quemados con el material que esta calentado. Estos tubos radiantes están hechos de aceros especiales que resisten altas temperaturas⁹.

Los hornos de ventilación forzada usan un método de operación diferente a la de un horno tradicional. También conocidos como hornos de convección forzada, estos hornos utilizan uno o varios ventiladores que empuja el calor alrededor del material o producto transfiriendo así calor. Estos hornos permiten calentar el material mucho más rápido y de manera equivalente debido a que el calor se distribuye de manera uniforme alrededor del material, en lugar de calentar una sola dirección como un horno regular.

De acuerdo al método por convección forzada los hornos se dividen en:

- a) **Hornos de convección horizontal.** Un horno de convección horizontal se caracteriza por la combustión de un material combustible, se transfiere a un fluido que circula dentro y este fluido es movido por medio de uno o varios ventiladores centrífugos colocados a lo largo de las paredes del horno y el techo. Las ventajas son que se da una convección equivalente debido a la distribución uniforme del calor, los flujos de calor son más estables y este tipo de hornos cumplen las demandas desde el punto de vista de la ingeniería¹⁰.
- b) **Hornos de convección vertical.** Un horno de convección vertical, se caracteriza por tener un conducto para extraer aire caliente de la cámara de combustión transmite el aire caliente a la cámara de calentamiento, dicho conducto se extiende a través de la cámara de ventilación y se comunica con el mismo; también se comunica con un conducto de salida con el fin de transmitir todo el aire extraído de la cámara de combustión y un volumen

fraccional del aire ventilado hacia el conducto de salida. Las ventajas son una reducción de la temperatura de los fluidos y un ajuste más fino de la temperatura en las áreas útiles del horno.

2.1.1. Energía para calentamiento en horno.

La energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos puede proceder de gases calientes (llama) producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de paredes, tubos radiantes o intercambiadores en general.¹³

- Energía eléctrica en diversas formas:
- Arco voltaico de corriente alterna o continua
- Inducción electromagnética
- Alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas
- Resistencia óhmica directa de las piezas
- Resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto de Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor

2.2. Ventilador.

Un ventilador es una máquina rotativa que pone el aire, o un gas, en movimiento. Se puede definir también como una turbo máquina que transmite energía para generar la presión necesaria para mantener un flujo continuo de aire. Dentro de una clasificación general de máquinas, los ventiladores son turbo máquinas hidráulicas, tipo generador, para gases⁹.

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc. y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía. Este propulsor adopta la forma de rodete con álabes, en el caso del tipo centrífugo, o de una hélice con palas de silueta y en número diverso, en el caso de los axiales¹¹.

El conjunto, o por lo menos el rodete o la hélice, van envueltos por una caja con paredes de cierre en forma de espiral para los centrífugos y por un marco plano o una envoltura tubular en los axiales. La envoltura tubular puede llevar una reja radial de álabes fijos a la entrada o salida de la hélice, llamada directriz, que guía el aire, para aumentar la presión y el rendimiento del aparato.

2.2.1. Leyes de los ventiladores.

Si un ventilador debe funcionar en condiciones diferentes de las ensayadas, no es práctico ni económico efectuar nuevos ensayos para determinar sus prestaciones. Mediante el uso de un conjunto de ecuaciones designado con el nombre de leyes de los ventiladores es posible determinar, con buena precisión, las nuevas prestaciones a partir de los ensayos efectuados en condiciones normalizadas. Al mismo tiempo, estas leyes permiten determinar las prestaciones de una serie de ventiladores geoméricamente semejantes a partir de las características del ventilador ensayado. Las leyes de los ventiladores están indicadas, bajo forma de relación de magnitudes, en ecuaciones que se basan en la teoría de la mecánica de fluidos y su exactitud es suficiente para la mayoría de las aplicaciones, siempre que el diferencial de presión sea inferior a 3 kPa, por encima del cual se debe tener en cuenta la compresibilidad del gas¹².

Con el ánimo de precisar un tanto más lo que expone la norma UNE, podríamos decir que cuando un mismo ventilador se somete a regímenes distintos de marcha o bien se varían las condiciones del fluido que trasiega, pueden calcularse por anticipado los resultados que se obtendrán a partir de los conocidos, por medio de unas leyes o relaciones sencillas que también son de aplicación cuando se trata de una serie de ventiladores homólogos, esto es, de dimensiones y características semejantes que se mantienen al variar el tamaño al pasar de unos de ellos a cualquier otro de su misma familia. Estas leyes se basan en el hecho que dos ventiladores de una serie homóloga tienen homólogas sus curvas características y para puntos de trabajo semejantes tienen el mismo rendimiento, manteniéndose entonces interrelacionadas todas las razones de las demás variables.

Las variables que comprenden a un ventilador son la velocidad de rotación, el diámetro de la hélice o rodete, las presiones total, estática y dinámica, el caudal, la densidad del gas, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro. Las normas internacionales ISO, 5801-96 (E) y WD 13348-1998, a estas variables les asignan los siguientes símbolos y unidades, que aquí usaremos para ilustrar las definiciones y aplicaciones¹⁴. En la tabla IV se muestran las variables.

Tabla IV. Variables de un ventilador.

Símbolo	Concepto	Unidad
D_r	Diámetro hélice/rodete	M
L_{wt}	Nivel Potencia total sonora	DB
N	Velocidad rotacional	s
P_r	Potencia mecánica suministrada al ventilador	W
P_f	Presión del ventilador	Pa
Q_v	Caudal de entrada	m ³ /s
R	Densidad	kg/m

Además debe tenerse en cuenta, antes de aplicar las leyes de los ventiladores que los valores conocidos lo sean de un aparato de la misma familia trabajando en las mismas condiciones bajo las cuales queremos determinar los nuevos valores y que las condiciones del ventilador considerado sean todas proporcionales a las correspondientes del tomado como punto de partida y cuyos valores reales de ensayo se conozcan¹⁴.

También es necesario que la velocidad del fluido dentro del ventilador sea proporcional de uno a otro y para lo cual debe comprobarse que la razón entre la velocidad periférica de dos puntos de un rodete sea la misma que la de entre la de dos puntos semejantes del otro rodete¹⁶.

A medida que se vayan exponiendo las leyes que rigen para las variaciones de los ventiladores, se desarrollarán ejemplos de aplicación para mejor facilitar su comprensión. En la figura 5 se representa la variación del diámetro con respecto a cada ventilador.

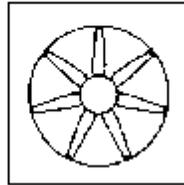
Caudal $q_v = q_{v0} \left(\frac{D_r}{D_{r0}} \right)^3$

Presión $p_F = p_{F0} \left(\frac{D_r}{D_{r0}} \right)^2$

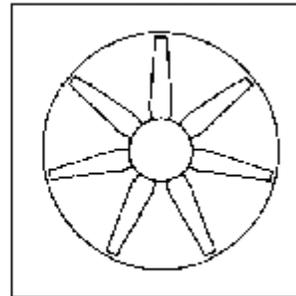
Potencia $P_r = P_{r0} \left(\frac{D_r}{D_{r0}} \right)^5$

Nivel Potencia sonora $L_{wvt} = L_{wvt0} + 70 \log \frac{D_r}{D_{r0}}$

D_0



D



El subíndice cero (0) indica la condición inicial de la variable considerada.

Figura 5. Variación del diámetro

Las leyes generales de los ventiladores aplican a cualquier tipo de ventilador: de flujo axial, centrífugo y ventiladores de flujo mixto, ventiladores de techo, sopladores de flujo cruzado y sopladores de vórtice¹³.

Ya hemos visto que la función de un ventilador puede ser presentada de dos maneras:

- 1- En la forma de gráfica de funcionamiento, mostrando presión estática, caballos de fuerza, eficiencia y nivel de ruido Vs volumen de aire.
- 2- En la forma de clasificación, el volumen del aire, velocidad del ventilador, HP y a ciertas presiones estáticas.

2.2.2. Ventiladores centrífugos.

En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta. Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes²²:

- 1- Álabes curvados hacia adelante,
- 2- Álabes rectos,
- 3- Álabes inclinados hacia atrás / curvados hacia atrás.

En la figura 6 se puede observar la disposición de los álabes.

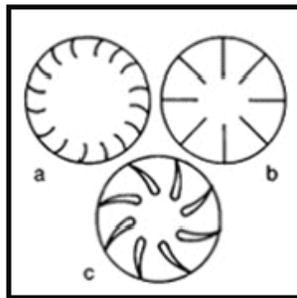


Figura 6. Álabes curvados hacia adelante, radiales y hacia atrás.

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con álabes curvadas en el mismo sentido del giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, poseen baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media, tal como la que se encuentran en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire, etc. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños álabes curvados y pueden provocar el desequilibrio del rodete²⁰. Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo fuera del punto de proyecto. Además, como su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, ha de tenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo²¹. En general, son bastante inestables funcionando en paralelo, vista su característica caudal-presión. En la figura pueden observarse las partes mencionadas. En la figura 7 se muestran los ventiladores centrífugos con álabes curvados.

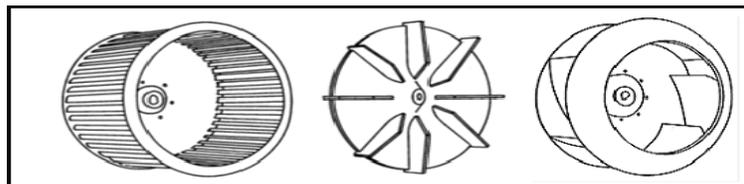


Figura 7. Ventiladores centrífugos con álabes curvados.

Los ventiladores centrífugos radiales tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se alcancen velocidades de transporte de materiales. Existen una gran variedad de diseños de rodetes que van desde los de "alta eficacia con poco material" hasta los de "alta resistencia a impacto". La disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre las mismas. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador. En este tipo de ventiladores la velocidad periférica es media y se utiliza en muchos sistemas de extracción localizada¹⁹.

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo "no sobrecargable"²⁰.

En un ventilador "no sobrecargable", el consumo máximo de energía se produce en un punto próximo al de rendimiento óptimo de forma que cualquier cambio a partir de este punto debido a cambios de la resistencia del sistema resultará en un consumo de energía menor. La forma de los álabes condiciona la acumulación de materiales sobre ellas, de forma que el uso de estos ventiladores debe limitarse como se indica a continuación:

1. **ÁLABES DE ESPESOR UNIFORME.** Los álabes macizos permiten el trabajo con aire ligeramente sucio o húmedo. No debe emplearse con aire conteniendo materiales sólidos ya que tienen tendencia a acumularse en la parte posterior de los álabes.
2. **LOS ÁLABES DE ALA PORTANTE.** Permiten mayores rendimientos y una operación más silenciosa. Los álabes huecos se erosionan rápidamente y se pueden llenar de líquido si la humedad es alta, por ello su uso queda limitado a aplicaciones en las que se manipule aire limpio.

Curva Característica de un Ventilador.

Según sea el ventilador, su curva característica adopta una u otra forma, Los ventiladores centrífugos, en general, son capaces de manejar presiones altas con caudales más bien bajos. En la figura 8 se observa una curva característica de un ventilador centrífugo en términos de la presión total, la presión estática y la presión dinámica²¹.

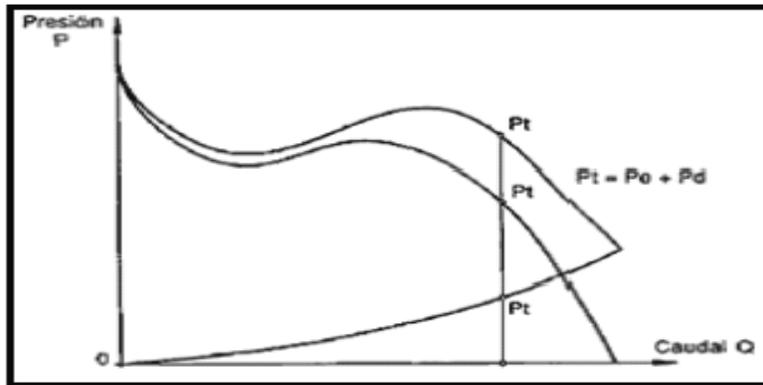


Figura 8. Curva característica de un ventilador.

Para trazar la Curva Característica de un ventilador, se debe llevar a cabo un procedimiento que procure los datos necesarios. Para poder disponer de los distintos caudales que puede manejar un ventilador según sea la pérdida de carga del sistema contra el cual esté trabajando, se ensaya el aparato variándole la carga desde el caudal máximo al caudal cero. Todos los pares de valores obtenidos caudal-presión se llevan a unos ejes coordenados, obteniéndose la curva característica¹⁷.

De acuerdo a las características de cada tipo de ventilador ya sea **Centrifugo**, **Helicocentrífugo** y **Axial** tenemos su relación Presión-Caudal y en la figura 9 se muestra que esa relación es diferente para cada uno de ellos¹⁹.

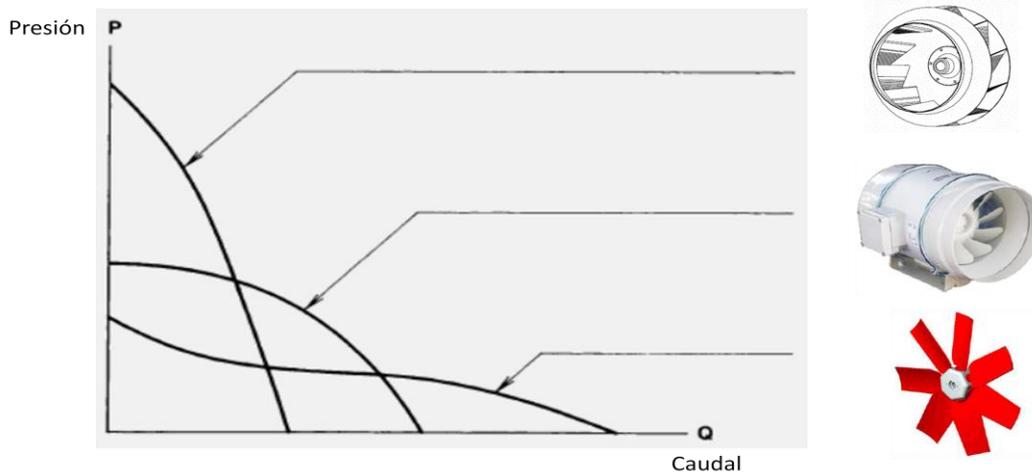


Figura 9. Caudal de los diferentes ventiladores.

2.2.3. Ecuaciones.

Caudal.

$$Q = V * A \tag{16}$$

Donde:

Q = Flujo volumétrico ó caudal m³/seg.

V = Velocidad del fluido (aire) m/seg.

A = Área de la sección por donde pasa el fluido (aire) m².

Flujo másico.

$$m = \rho * Q \tag{17}$$

Donde:

m = Flujo másico kg/seg

ρ = Densidad del fluido kg/m³

Q = Flujo volumétrico ó caudal m³/seg

III. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Es una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicado a un metal o aleación en estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas⁵.

Existen distintos tipos de tratamientos térmicos que pueden ser aplicados a los aceros dependiendo de las características finales que se quieren obtener en el producto, estos tratamientos son los siguientes:

3.1. Tipos de tratamientos térmicos de los aceros

Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos de los caeros como son:

- 1) **Recocido:** en este proceso se calienta al acero hasta la temperatura de austenización, luego se mantiene por un tiempo a esta temperatura y luego se deja enfriar muy lentamente a una velocidad controlada, este proceso se realiza en un intervalo de temperatura de 800 a 900° C⁵. Existen varios tipos de recocido, pero su función principal es proporcionar suavidad, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, refinar el grano o aumentarlo de tamaño y en algunos casos mejorar el maquinado⁷.
- 2) **Normalizado:** este proceso se lleva al acero a una temperatura de 850 a 950° C por un tiempo determinado¹⁸, seguido de un enfriamiento en aire

quieto hasta la temperatura ambiente. El propósito de éste tratamiento es producir un acero más duro y más fuerte que el obtenido por un recocido.

- 3) **Temple:** consiste en el enfriamiento violento del acero a partir de la temperatura de austenización. Este enfriamiento se realiza generalmente por inmersión de la pieza en agua, aceite, baños de sales; y en algunos casos, mediante agitación en aire³. En este proceso el acero se endurece debido a la formación de una fase microestructural llamada martensita. Este tratamiento es el que provee de la mayor dureza a los aceros.
- 4) **Martempering:** en este tratamiento se detiene el temple por encima de Ms (Ms es la temperatura a cual comienza a formarse la martensita) para la temperatura de toda la pieza se homogenice mediante una etapa isotérmica. Posteriormente, se enfría lentamente dando paso a una transformación de la martensita por toda la pieza⁶.
- 5) **Austempering:** es un método alternativo cuyo fin es evitar el agrietamiento y la distorsión asociados al temple y revenido. Como en el caso del martempering, se el temple justo por encima de Ms. En este tratamiento la etapa isotérmica se extiende hasta que se complete la transformación bainítica. Como esta estructura bainítica ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) es más estable que la martensita, el enfriamiento posterior no da lugar a su transformación⁵.
- 6) **Revenido:** es un tratamiento térmico que se aplica luego de realizado un temple o un normalizado de un acero con el objeto de reducir su dureza, aumentar su tenacidad y su ductilidad⁸.
 - ***En el caso de este estudio el tratamiento térmico para el cual el horno se está diseñado, es un revenido de baja temperatura.***

3.1.1. Revenido.

Los aceros, después del proceso de temple, suelen quedar frágiles para la mayoría de los usos al que van a ser destinados. Además, la formación de martensita da lugar a considerables tensiones en el acero.

Por esta razón, las piezas después del temple son sometidas casi siempre a un revenido (al conjunto de los tratamientos térmicos también se le denomina “bonificado”)⁶, que es un proceso que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la temperatura crítica seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Cuando se pretenden los objetivos se recurre al doble revenido, el primero con enfriamiento rápido y el segundo con enfriamiento lento hasta -300°C . En general los fines que se consiguen con este tratamiento térmico son los siguientes¹²:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple¹³.
- Modificar las características mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos:
 - Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
 - Aumentar las características de ductilidad y las de tenacidad¹⁵.

3.1.2. Tipos de revenido.

Los diferentes tipos de revenido se describen a continuación.

a) Baja temperatura o eliminación de tensiones.

- Finalidad: Reducir tensiones internas del material templado, sin reducir la dureza²⁶.
- Procedimiento: Seleccionar el acero adecuado, seleccionar la temperatura de calentamiento, determinar la dureza inicial, calentar la pieza de 200°C a 300°C, mantener la temperatura constante.
- Dependiendo del espesor de la pieza, sacar la pieza del horno y enfriarla, determinar la dureza final¹⁷.

b) Alta temperatura o bonificación

- Finalidad: Aumentar la tenacidad de los aceros templados.
- Procedimiento: Seleccionar el acero adecuado, seleccionar la temperatura de calentamiento, determinar la dureza inicial, calentar la pieza de 580°C a 630°C, mantener la temperatura constante, sacar la pieza del horno y enfriarla lentamente preferiblemente al aire, determinar la dureza final²².

c) Estabilización

- Finalidad: Eliminar tensiones internas de los aceros templados para obtener estabilidad dimensional³⁴.
- Procedimiento: Seleccionar el acero adecuado, determinar la dureza inicial, calentar la pieza a 150°C, mantener la temperatura constante ($t=k$ 6-8 h), sacar la pieza del horno y enfriarla lentamente preferentemente al aire, determinar la dureza final³⁶.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes:

- La temperatura de revenido sobre las características mecánicas
- El tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido).
- La velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido).
- Las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 por cada 25mm de espesor o diámetro).

La temperatura de revenido con el tipo de acero y el empleo y tipo de solicitaciones que haya de soportar la pieza. De una manera cabe indicar los intervalos de temperatura para el revenido de acero como se muestra en la tabla V.

Tabla V. Intervalos de temperaturas para revenido de aceros.

Aceros de cementación	140 a 200 °C
Aceros de herramientas	200 a 300 °C
Aceros para temple y revenido	350 a 650 °C
Aceros rápidos	550 a 580 °C

La duración del revenido es de gran importancia para que las transformaciones deseadas puedan producirse con seguridad. Generalmente es de 1 a 3 h.

Los revenidos pueden ser homogéneos y heterogéneos:

- 1) Homogéneos: La pieza en su totalidad esta a una temperatura uniforme, se realiza después del temple, con baños de aceite, sales, hornos de circulación de aire y de recocido, cuando las temperaturas son altas. Estas se usan piezas de construcción de fabricación en serie y herramientas³⁰.
- 2) Heterogéneo: La pieza es sometida a diferentes temperaturas de revenido en diferentes partes; para que sea esto correcto la temperatura ha de estimarse generalmente sobre la base de los colores del revenido.²⁹

3.2. Materiales refractarios que pueden ser utilizados como aislantes térmicos.

Para el diseño del horno, se utilizara como material aislante fibra cerámica, los materiales adicionales que son nombrados, también se utilizan comúnmente pero si se van a utilizar se debe calcular nuevamente las pérdidas de calor.

3.2.1. Fibra cerámica.

La fibra es un producto obtenido por una mezcla de alúmina y sílice (Al_2O_3 y SiO_2) de alta pureza que se funden en un horno eléctrico, y posteriormente fibrizadas por la aplicación una corriente de aire seco²⁴.

- a) **Manta cerámica:** las mantas cerámicas son producto para ser empleados en recubrimientos en recubrimientos individuales o multicapas. Presentamos las siguientes²⁵:

- b) **Manta Cerámica 2300.** Temperatura máxima de uso: 1260°C. Este producto se fabrica en tres densidades diferentes: 4, 6 y 8 lb/pie³ (64, 96, 128 kg/m³). Las fibras elementales se entrelazan entre sí por un proceso especial en la línea de fabricación, lo cual le confiere al producto una alta resistencia mecánica. El uso de este producto es variado dentro de la aplicación de aislamiento de alta temperatura, siendo la aplicación más importante el revestimiento de hornos de proceso, calentadores, generadores de vapor, calderas, hornos de tratamiento térmico, etc, por el llamado sistema de multiplacas²⁸.

- c) **Manta cerámica de Alta Temperatura 2600.** Temperatura máxima de uso 1427°C. Este producto se fabrica solo en cantidades de 6 y 8 lb/pie³.

3.2.2. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio se conoce comúnmente como un material aislante. También se usa como un agente de refuerzo con muchos productos poliméricos; normalmente se usa para conformar plástico reforzado con vidrio que por metonimia también se denomina fibra de vidrio, una forma de material compuesto consistente en polímero reforzado con fibra. Por lo mismo, en esencia exhibe comportamientos similares a otros compuestos hechos de fibra y polímero como la fibra de carbono. Aunque no sea tan fuerte o rígida como la fibra de carbono, es mucho más económica y menos quebradiza²⁷.

3.2.3. Tipos de fibra de vidrio más usados comúnmente

Las de vidrio clase E (E-glass: vidrio de aluminio-borosilicato con menos de 1% peso/peso de óxidos alcalinos, principalmente usada para GRP), pero también se usan las clases A (A-glass: vidrio alcali-cal con pocos o ningún óxido de boro), clase E-CR (E-CR glass: de silicato álcali-cal con menos de 1% peso/peso de óxidos alcalinos, con alta resistencia a los ácidos), clase C (C-glass: vidrio álcali-cal con alto contenido de óxido de boro, usadas por ejemplo en fibras de vidrio con filamentos cortos), clase D (D-glass: vidrio de borosilicato con una constante dieléctrica alta), clase R (R-glass: vidrio de aluminio silicatos sin MgO ni CaO con altas prestaciones mecánicas) y la clase S (S-glass: vidrio de aluminio silicatos sin CaO pero con alto contenido de MgO con alta resistencia a la tracción).²⁶

Las fibras de vidrio son buenos aislantes térmicos debido a su alto índice de área superficial en relación al peso. Sin embargo, un área superficial incrementada la hace mucho más vulnerable al ataque químico. Los bloques de fibra de vidrio atrapan aire entre ellos, haciendo que la fibra de vidrio sea un buen aislante térmico, con conductividad térmica del orden de $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.⁷

3.2.4. Lamina de acero cold roll.

Láminas Cold Rolled.

Láminas fabricadas a través de laminación en frío de bandas o bobinas en caliente reduciendo al espesor mediante procesos térmicos y estiramientos para obtener las propiedades características³⁷.

Usos:

- Fabricación de perfiles soldados.
- Electrodomésticos.
- Partes automotrices.
- Carpintería metálica.
- Muebles metálicos.
- Tambores.
- Carrocerías.
- Industria de la construcción.

IV. QUEMADORES.

Los quemadores son los equipos donde se realiza la combustión, por tanto deben contener los tres vértices del triángulo de combustión, es decir que deben lograr la mezcla íntima del combustible con el aire y además proporcionar la energía de activación⁵⁰. Aquí se describen los quemadores para combustibles líquidos y gaseosos, ya que los combustibles sólidos se queman sobre parrilla, o requieren un tratamiento previo del combustible, unido a quemadores de diseños especiales⁴⁶.

Los Quemadores están diseñados para aplicaciones en las que es deseable tener todos los componentes necesarios para un sistema de combustión de alta eficiencia⁵².

Quemador. El quemador básico incluye el conjunto del quemador con encendedor de chispa, cámara de combustión de tubo recto, soplador, relación de regulador de gas, orificio fijo de gas de fuego alto, ajustable de derivación bajo el fuego y la varilla de llama⁴⁸.

4.1. Tipos de quemadores.

4.1.1. Quemadores para Líquidos.

La primera tarea que debe cumplir un quemador para líquidos es la de poner el combustible en fase gaseosa o pulverizarlo en gotas de diámetro menor que una micra para que se mezcle íntimamente con el aire.

La forma de conseguirlo sirve para clasificar básicamente los quemadores para líquidos⁴⁵:

- Quemadores de vaporización o gasificación (viscosidad inferior a 1,5°E a 10 °C).
- Quemadores de emulsión (viscosidad hasta 45°E a 50 °C).
- Quemadores de pulverización.
- Por fluido auxiliar. (Viscosidad entre 3,5°E y 5°E a 50 °C).
- Mecánica centrífuga. (Viscosidad entre 5°E y 10°E a 50 °C).
- Mecánica por presión directa. (Viscosidad entre 1,5°E y 3°E a 50 °C).
- Pulverización neumática.

4.1.2. Quemadores de vaporización o gasificación.

El elemento principal de todos los quemadores por vaporización es una cazoleta o cubeta formada por⁴⁴:

- Taza o crisol.
- Difusor de aire.

Se distinguen entre quemadores de vaporización con: Tiro natural y Ventilador.
Campo de aplicación⁴⁷:

- Combustibles con una viscosidad inferior a 1,5° E a 10°C.
- Sólo alcanza hasta potencias de 35 kW.
- Bajo rendimiento.
- Elevada opacidad.

4.1.3. Quemadores de emulsión.

Se emplean para reducir los efectos contaminantes de los combustibles pesados.

Consisten en producir una emulsión del combustible líquido con el agua, al comenzar la combustión una gota de emulsión, se produce la rápida evaporación de la fracción de agua contenida en ella, provocando el fraccionamiento de la gota en infinidad de partículas⁵⁴.

El interés de este tipo de quemador es:

- Trabaja con exceso de aire reducido.
- Reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno.
- Reducción del SO₃ en SO₂.
- Reduce los no quemados sólidos.
- El principal inconveniente es el consumo suplementario de calor.

4.1.4. Quemadores de pulverización por fluido auxiliar.

La energía que se precisa para atomizar el combustible la aporta el fluido auxiliar⁴⁸:

- Aire o neumática (Viscosidad del combustible 3 - 5° E a 50 °C).
- Baja presión (0,1 a 0,5 atm).
- Media presión (0,1 a 1,5 atm).
- Alta presión (0,5 a 7 atm).
- Vapor de agua (Viscosidad del combustible 5 - 8° E a 50°C).

4.1.5. Quemador de pulverización mecánica centrífugo o de copa rotativa.

El combustible se impulsa a través de un eje hueco a una pieza troncocónica, llamada copa⁵². Que gira a gran velocidad (3,000 a 4,000 r.p.m., normalmente), al alcanzar el extremo de la copa, tiende a disgregarse en diminutas partículas. En la figura 10 se representa un quemador de manera general⁵³.

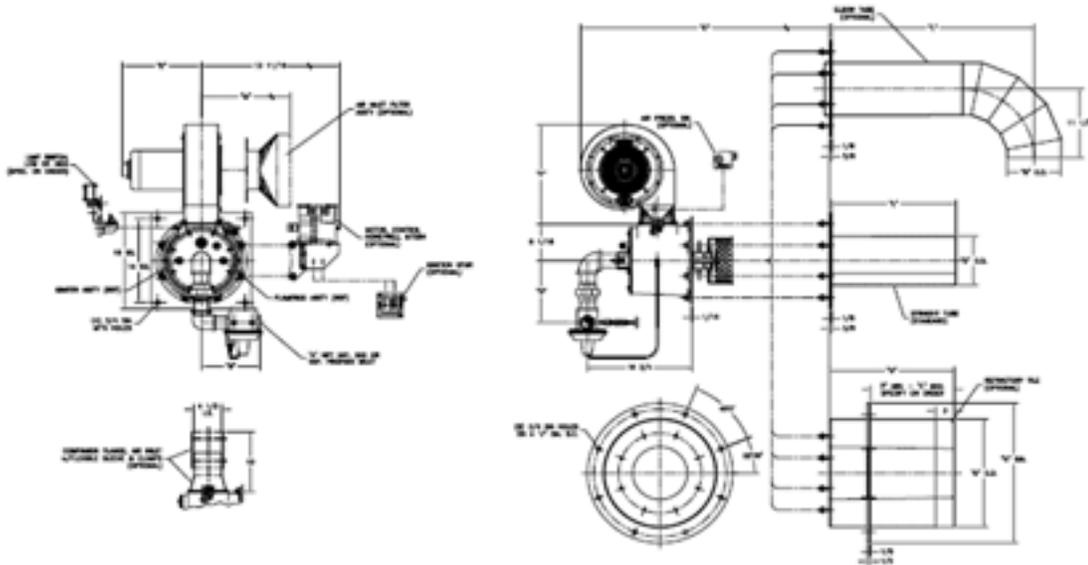


Figura 10. Representación del quemador.

Componentes:

- Tamaño del quemador.
- Tubo Assy., Combustor Heterosexual.
- Tubo Assy., Codo Combustor.
- Azulejos Assy., Combustor refractaria.
- El conjunto del ventilador, MBA.
- Compañero Brida, entrada de aire.
- Kit Assy, control de motores y de acoplamiento.
- Colector Assy., Gas Natural Standard.
- Colector Assy., Propano estándar.
- Llama de acoplamiento.
- UV Scanner.
- Kit Assy., Transformador de encendido.
- Filtro Assy., Ventilador de entrada.
- Kit Assy., Límite de interruptor de fuego bajo.
- Kit Assy., Límite de interruptor de fuego alto.
- Kit Assy. Final de carrera de baja y alta fuego.
- Interruptor, presión de aire (1.20 "wc / 0.25-5kPa).
- Válvula de 11-1, N.O. respiradero.

4.1.6. Tipos de quemadores y capacidades.

Tabla VI. Tipos de quemadores y capacidades.

No. de Modelo Gas	Capacidad. (1000 Btu/h)	Motor Hp	Presión estática del aire (Pa)	Flujo de aire (Nm ³ /h)	Flujo de gas (Nm ³ /h)	Aire en exceso (%)	Emisión de la Llama	Longitud (mm)
PBG 1000	Max.985	¾	950	298	27.8	10	35:1	585
	Min. 31		43	63.4	0.80	710		
PBG 2000	Max.998	¾	933	525	49.0	10	61:1	1140
	Min. 31		35	101	0.80	1190		
PBG 3000	Max.1016	¾	829	589	55.0	10	39:1	1220
	Min. 55		35	121	1.42	770		
PBG 5000	Max.2660	3	1037	1078	100.6	10	38:1	1630
	Min.101		17	138	2.63	440		

V. DISEÑO

5.1. Consideraciones a tener en cuenta en el diseño de un horno de revenido de baja temperatura.

A continuación se determina las consideraciones en el diseño.

a) Operativas:

- Que sea a base de convección forzada
- El flujo volumétrico de aire debe ser por medio de ventiladores centrífugos de tipo rodete.
- Los elementos de calentamiento deben ser a base de la velocidad del aire y la combustión.
- Las características del horno se deben adecuar a la capacidad de producción y al tratamiento térmico establecido.
- Se deberá considerar el flujo de calor absorbido y flujo de calor perdido para optimizar el tratamiento térmico de revenido.

b) Medio ambiente de desempeño:

- Temperatura de trabajo optima.
- Tiempos de residencia y traslado.

5.2. Diseño propuesto.

5.2.1. Pautas para el diseño del horno de revenido de baja temperatura según los requerimientos.

La propuesta del horno que se hace en este trabajo es un horno de convección forzada tipo horizontal.

La base del funcionamiento de este tipo de horno es por medio de ventiladores centrífugos de tipo rodete, los cuales toman el aire caliente generado por los quemadores y los distribuye por las paredes para que este posteriormente llegue a al producto a través de un flujo ascendente.

La convección forzada tiene lugar cuando la fuerza motriz del ventilador mueve el fluido con una velocidad determinada sobre la superficie del producto que se encuentra a una temperatura prescrita menor que la del fluido.

En la figura 11. Se puede visualizar el diseño del horno.

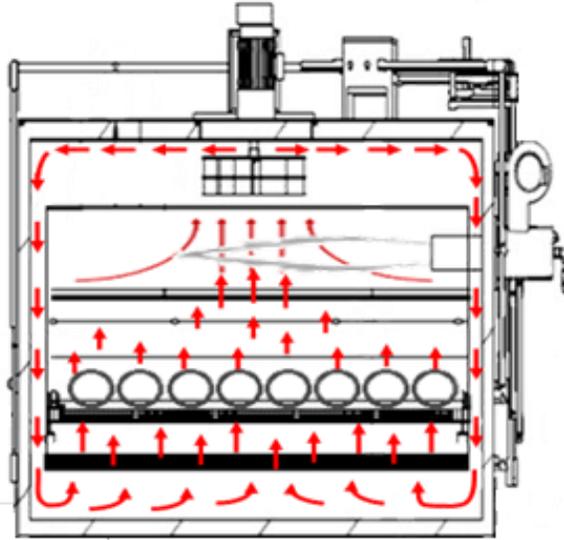


Figura 12. Diseño propuesto

5.3. Calculo de la cantidad de flujo volumétrico para llevar a cabo la convección forzada dentro del horno.

Consideraciones:

- Se utilizan ventiladores centrífugos de tipo rodete de alta presión.
- El ventilador que estamos seleccionando para este diseño tiene un diámetro de 33 pulgadas (0.84 m), una altura de 350 mm (0.35 m), gira a 1350 rpm y consta de un motor de 15 Hp.
- Para este trabajo se empleó la utilización de 9 ventiladores centrífugos, distribuidos en el techo del horno. (figura 14).
- Tomando en cuenta a las características del ventilador se harán los cálculos necesarios, para definir el volumen de aire caliente entregado por el ventilador.⁴⁰

5.3.1. Volumen de aire desplazado por el ventilador.

$$V = \pi * r^2 * h$$

Donde:

V = Volumen del cilindro, m³.

r² = Radio del cilindro, m².

h = Altura que tiene nuestro cilindro, m.

$$V = \pi (0.42 \text{ m})^2 (0.35\text{m})$$

V = 0.19 m³ por ventilador

5.3.2. Ventilador centrífugo.

En la figura 12 se muestra el tipo de ventilador que se empleara en la fabricación del horno.

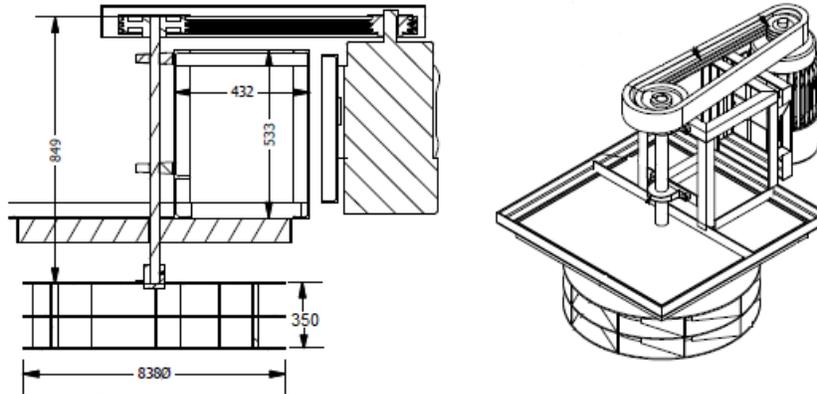


Figura 13. Ventilador centrífugo tipo rodete de alta presión.

5.3.3. Vista superior del horno.

A continuación en la figura 13 se visualiza la parte superior del horno.

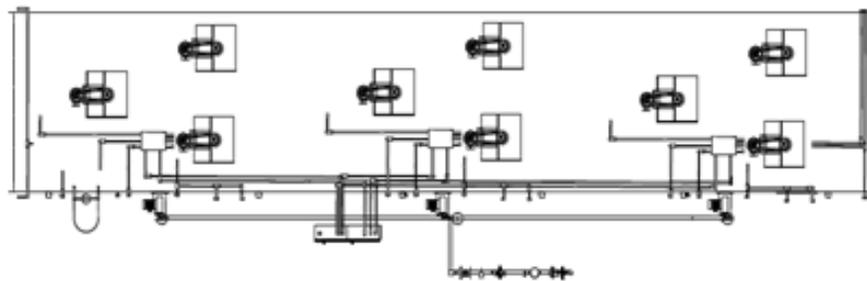


Figura 14. Vista superior del horno.

5.3.4. Flujo volumétrico desplazado por los ventiladores de aire dentro del horno.

$$Q = V * \frac{Rev}{min} * \# \text{ total de ventiladores.}$$

$$Q = (0.19 \text{ m}^3) * (1350 \text{ rev/min}) * (9)$$

$$Q = 2346.55 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$Q = 39.10 \text{ m}^3/\text{s.}$$

5.4. Requerimientos de velocidad de aire dentro del horno.

Consideraciones:

De acuerdo al tipo de horno que se estableció como propuesta:

- Se estima generar una velocidad de aire de aproximadamente 3 m/s. Esta velocidad podría variar de acuerdo al diseñador.
- Se toma en cuenta la abertura de la placa base donde va a sostenerse el producto a través del horno, y es por donde pasa el aire para así llegar a nuestro producto.
- Existen diferentes tipos de placas que se pueden emplear para sostener el producto dentro del horno, en la figura 14 se presenta diferentes ejemplos:

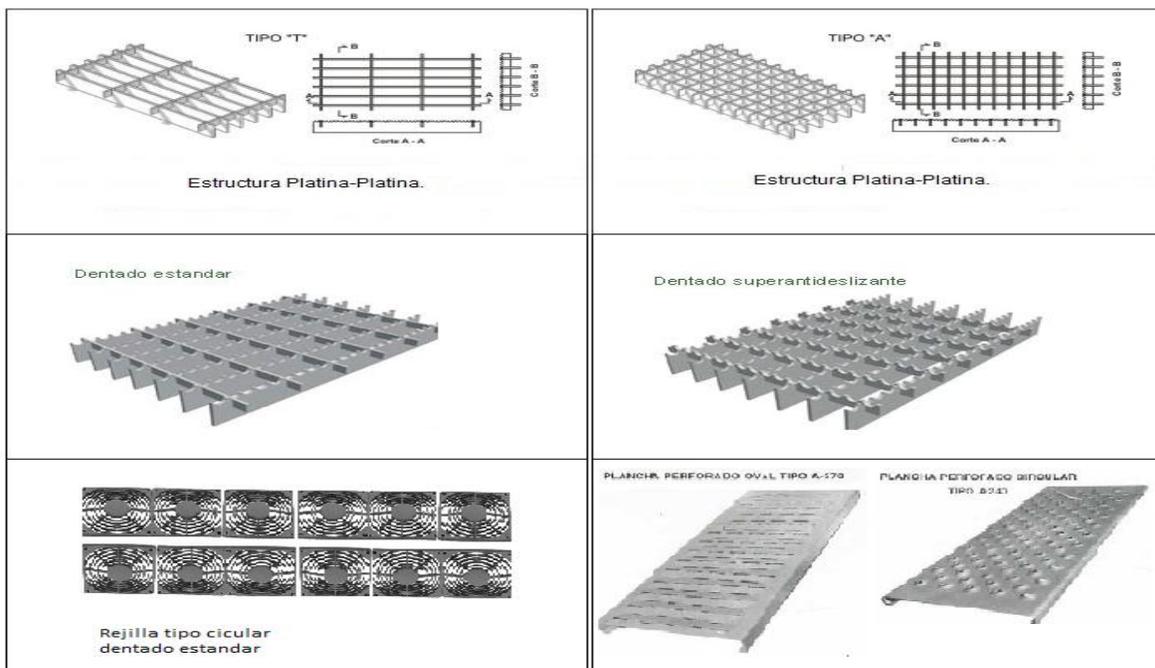


Figura 15. Tipos de Placas.

Para el diseño del horno de revenido de baja temperatura, se elige una placa estándar que tiene las siguientes características; mide 3.4 m de largo por 1.0 m de ancho y tiene un 16% de espacio libre⁴¹. De abertura es de 3/16'' por 11/4''. A continuación en la figura 15 se muestra la placa seleccionada para este proyecto.

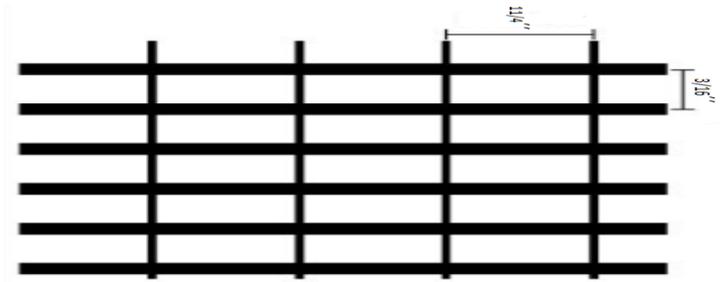


Figura 16. Placa base seleccionada que sostiene el producto.

$$A = (21.10 \text{ m}) * (3.8 \text{ m})$$

$$A = (80.18 \text{ m}^2) * (16\%)$$

$$A_{\text{libre}} = 12.82 \text{ m}^2$$

5.4.1. Determinación de la velocidad de aire sobre el producto.

La fórmula para saber el **flujo de aire** es:

$$Q = AV$$

Resolviendo esta fórmula obtenemos la **velocidad de aire** a mover

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{39.10 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}}{12.82 \text{ m}^2}$$

Velocidad de aire. **V = 3.04 m/s.**

5.5. Determinación de los coeficientes convectivos presentes en la convección forzada.

Propiedades del producto a considerar

Propiedades físicas del producto:

- Diámetro 0.1397 m
- Radio 0.07m
- Constante de conductividad térmica (K) 54.00 W/m-K
- Densidad (ρ) 7860.00 kg/m³
- Capacidad Calorífica (Cp) 460.0 J/Kg°C

Propiedades del aire:

- Numero de prandtl (Pr) 0.71
- Conductividad térmica (K) 0.0268 W/m-K
- Viscosidad cinemática Aire (ν) $1.60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Factor de roce 0.52 (tabla 2)

5.5.1. Determinación del número de Reynolds.

Para determinar el número de Reynolds se considera el factor de porosidad o de roce, que afecta el flujo del fluido antes de llegar al producto.

- Este factor de porosidad se da al pasar el aire caliente por la placa donde se encuentra asentado el producto, para realizar la convección forzada.

$$Re = \frac{V * D}{\nu * \mu}$$

$$Re = \frac{3.04 \frac{m}{seg} * 0.1397 \text{ m}}{1.60 \times 10^{-5} \frac{m}{seg} * 0.52}$$

Re = 50749.61 Este número de Re nos dice que se genera un flujo turbulento dentro del horno.

5.5.2. Determinación de los números de Nusselt R y Nusselt TR.

$$Nuss_R = 0.664 * Re^{0.5} * Pr^{0.333}$$

$$Nuss_R = 0.664 * 50749.61^{0.5} * 0.71^{0.333}$$

Nuss_R = 134.92

$$Nuss_{TR} = \frac{0.037 * Re^{0.8} * Pr}{1 + 2.443 * Re^{-0.1} * (Pr^{0.666} - 1)}$$

$$Nuss_{TR} = \frac{0.037 * 50749.61^{0.8} * 0.71}{1 + 2.443 * 50749.61^{-0.1} * (0.71^{0.666} - 1)}$$

Nuss_{TR} = 183.53

$$Nuss_{Total} = Nuss_R + Nuss_{TR}$$

$$Nuss_{Total} = 134.92 + 183.53$$

$$\mathbf{Nuss_{total} = 318.46}$$

5.5.3. Determinación del coeficiente de convección.

Para saber la influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección.

$$h = Nuss_{total} * \left(\frac{K}{D}\right)$$

$$h = 318.46 * \left(\frac{0.0268 \frac{W}{m * K}}{0.1397 m}\right)$$

$$\mathbf{h = 61.09 W/m-K}$$

5.5.4. Determinación del número de Biot

Para conocer la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y transferencia de calor por conducción en la superficie de dicho cuerpo.

$$Bi = \frac{h * r}{K}$$

$$Bi = \frac{61.09 \frac{W}{m * K} * 0.07}{54 \frac{W}{m * K}}$$

$$\mathbf{Bi = 0.08}$$

5.5.5. Determinación del Tiempo de Calentamiento.

- Se considera un cuerpo sólido de masa m, volumen V, área superficial As, densidad y calor específico Cp, inicialmente a una temperatura Ti. En el instante t = 0, la temperatura del fluido que rodea al cuerpo es Tf y el coeficiente de convección h.
- Se supone que Tf > Ti aunque el análisis también sería válido para Tf < Ti.

- Al considerar el sistema como concentrado se supone que la temperatura dentro del cuerpo es uniforme en cada instante y sólo cambia con el tiempo $T = T (t)$.
- Para este diseño de horno hemos establecido estas condiciones de temperatura de trabajo; $T_i = 40^{\circ}\text{C}$ $T_f = 230^{\circ}\text{C}$. Aplicando la ecuación de Heisler tenemos que:

$$t = \frac{7860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 460 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}} * 0.1397 \text{ m}}{6 * 61.09} \ln \frac{40 - 230}{229 - 230}$$

$$t = 6282.32 \text{ s.}$$

$$t_{\text{total}} = 1 \text{ h } 44 \text{ min.}$$

VI. SELECCIÓN DE MATERIALES.

6.1. Materiales elegidos para el diseño del horno de revenido de baja temperatura.

Los materiales empleados para las paredes, puertas, techo, etc. se seleccionarán buscando la mejor distribución de calor dentro del horno para así tener menores pérdidas y mayor rendimiento en el calentamiento del producto.

Algunas recomendaciones para la selección y colocación de los materiales elegidos se basan en algunos factores como:

- Conductividad térmica.
- Propiedades mecánicas.
- Temperatura máxima de trabajo.
- Resistencia a la corrosión.
- Costos.
- Otros factores de menor importancia que también pueden ser tomados en cuenta son: la forma de colocación del refractario y de aplicación.

Existe una amplia gama de materiales que se pueden emplear hoy día para el diseño de hornos de tratamiento térmicos, tales materiales se citan a continuación en la tabla VII.

Tabla VII. Tipos de materiales térmicos.

	Densidad (Mg/m ³)	Carga rotura (Mpa)	Módulo elastividad (Gpa)	Temp. fusión (°C)	Módulo específico (x10 ⁶ m ² /s ²)	Resistencia específica (x10 ⁶ m ² /s ²)
Vidrio E	2.55	3448	72.4	<1725	28	1.35
Vidrio S	2.50	4483	86.9	<1725	35	1.79
SiO ₂	2.19	5862	72.4	1728	33	2.68
Al ₂ O ₃	3.95	2068	172	2015	55	0.66
ZrO ₂	4.84	2068	345	2677	71	0.43
Carbono (alta resistencia)	1.50	2759	276	3700	184	1.84
Carbono (alto módulo)	1.50	1862	531	3700	354	1.24
BN	1.90	1380	90	2730	47	0.73
Boro	2.36	3448	379	2030	161	1.46
B ₄ C	2.36	2276	482	2450	204	0.96
SiC	4.09	2068	482	2700	118	0.51
TiB ₂	4.48	103	510	2980	114	0.002
Be	1.83	1276	303	1277	166	0.70
W	19.40	400	407	3410	21	0.021
Polietileno	0.97	2586	119	147	122	2.67
Poliamida	1.14	828	2.8	249	2.46	0.726
Poliamida	1.44	3620	124	500	86	2.51
Monocristales Al ₂ O ₃	3.96	20690	428	1982	108	5.22
Monocristales BeO	2.85	13103	345	2550	121	4.60
Monocristales B ₄ C	2.52	13793	482	2450	191	5.47
Monocristales SiC	3.18	20690	482	2700	151	6.51
Monocristales Si ₃ N ₄	3.18	13793	379		119	4.34
Monocristales de grafito	1.66	20690	703	3700	423	12.46
Monocristales Cc	7.20	3021	241	1890	33	0.42

La gama de materiales mencionados anteriormente, pueden ser utilizados sin ningún problema pero se tendría que calcular nuevamente las pérdidas de calor. Para el diseño del horno de revenido de baja temperatura, se utilizara fibra cerámica, fibra de vidrio y placa de acero cold rolled.

La transferencia de calor a través del material de construcción también se ve influenciada por la resistencia del aire cercano a la superficie sólida (aire interno y externo) esta capa tiene una determinada resistencia térmica y por lo tanto se tiene que considerar para determinar el coeficiente global de transferencia de calor³². En la figura 16 se muestra la partición de muros así como la distribución de los materiales de fabricación.

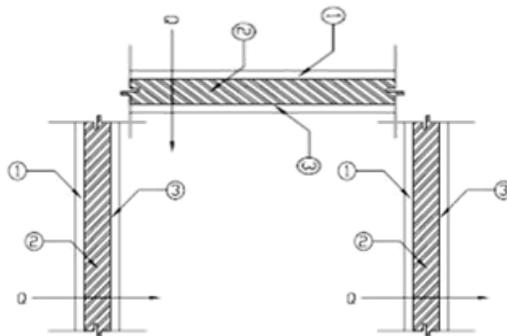


Figura 17. Partición de muros y techo.

Tomando en cuenta la distribución de los materiales se determinaron sus respectivas resistencias térmicas. Como se muestra en la tabla VIII

Tabla VIII. Coeficiente global de transmisión de calor.

1	Lamina de acero ext.	3.78×10^{-5}
2	Fibra Cerámica	$1.61 \times 10^{+00}$
3	Fibra de Vidrio	1.50×10^{-2}
4	Lamina de acero int.	3.78×10^{-5}
$\Sigma R =$		$1.63 \times 10^{+00}$
$U = 1/\Sigma R = m^2 \cdot K/W$		
$U = 1/1.63 \times 10^{+00} = 6.15 \times 10^{-01}$		

6.1.1. Cálculo se carga térmica.

La carga térmica es la cantidad de calor que se debe suministrar al sistema por las pérdidas que se pudiera tener para mantener las condiciones adecuadas ⁽²⁾. Por construcción se puede ver como la velocidad de transferencia de calor a través de una pared, el techo, etcétera y depende de tres factores:

1. La diferencia de temperaturas a través de la cual fluye el calor
2. El área de la superficie a través de la cual fluye el calor.
3. El coeficiente global de transferencia de calor (U) del material el cual es la suma de los coeficientes de resistencia térmica (R). $U = 1/\Sigma R$

La ecuación de transferencia de calor es:

$$Q = U * A * \Delta T$$

Donde:

Q = Velocidad de transferencia de calor, W.

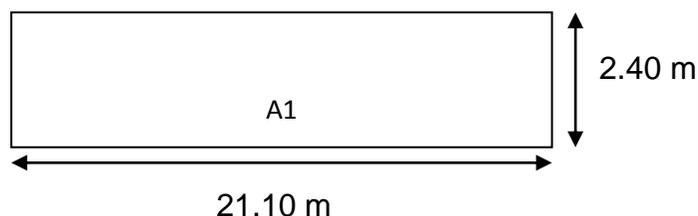
U = Coeficiente global de transferencia de calor, $W/m^2 \cdot K$

A = Área de la superficie a través de la cual pasa el calor, m^2 .

Δt = Diferencial de temperatura, K.

6.1.2. Calculo para el flujo de calor que se pierde en las paredes del horno.

- Área de las paredes del horno.



$$A1 = 21.10 \text{ m} \times 2.40 \text{ m} = 50.64 \text{ m}^2$$

- Como son dos paredes laterales del mismo tamaño entonces el área total es:

$$At1 = 2 \times A1$$

$$At1 = 2 \times 50.64 \text{ m}^2 = 101.28 \text{ m}^2$$

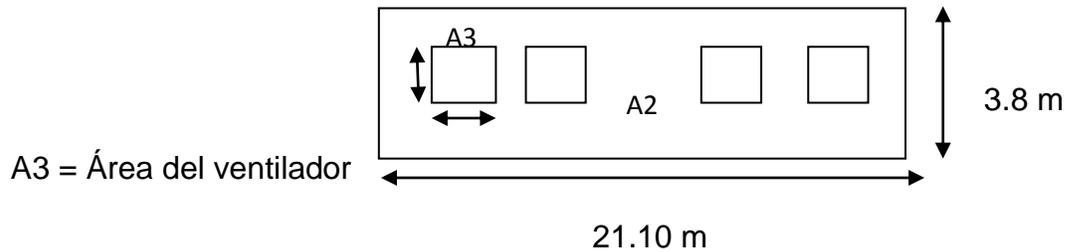
$$\mathbf{At1 = 101.28 \text{ m}^2}$$

$$Q = (0.615 \text{ W/m}^2\text{K}) (101.28 \text{ m}^2) (503 \text{ K} - 303 \text{ K})$$

$$\mathbf{Q = 12458.95 \text{ W}}$$

6.1.3. Calculo para el flujo de calor que se pierde en el techo del horno.

- Área total del techo del horno.



$$A2 = 21.1 \text{ m} \times 3.8 \text{ m} = 80.18 \text{ m}^2$$

$$A3 = 0.88 \text{ m} \times 0.88 \text{ m} = 0.774 \text{ m}^2$$

$$At2 = A2 - (A3 \times 9) = 80.18 \text{ m}^2 - (0.774 \text{ m}^2 \times 9) = 73.21 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{At2 = 73.21 \text{ m}^2}$$

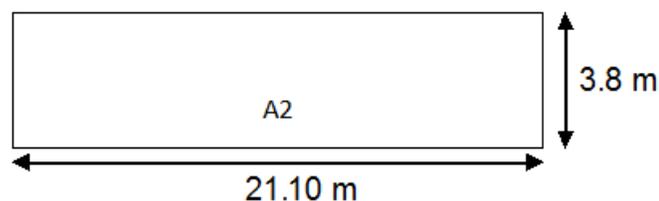
$$Q = (0.615 \text{ W/m}^2\text{K}) (73.21 \text{ m}^2) (503 \text{ K} - 303 \text{ K})$$

$$\mathbf{Q = 9004.83 \text{ W}}$$

La base en la cual están montados los ventiladores están fabricados del mismo material que está diseñado todo el horno y además poseen el mismo espesor debido a esto se trabaja el área de todo el techo incluyendo cada base que corresponde a cada ventilador. Debido a eso se asume que la pérdida de calor es uniforme³¹.

6.1.4. Calculo para el flujo de calor que se pierde en el piso del horno.

- Área total del piso del horno.

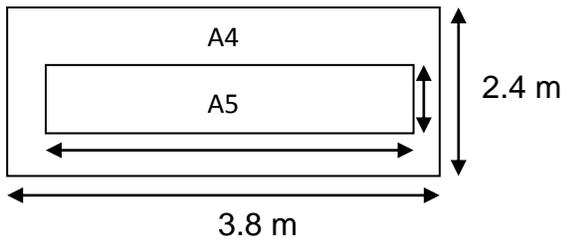


Área similar a la del techo $A_2 = 80.18 \text{ m}^2$
 $A_2 = 80.18 \text{ m}^2$

$$Q = (0.615 \text{ W/m}^2\text{K}) (80.18 \text{ m}^2) (503 \text{ K} - 303 \text{ K})$$
$$**Q = 9863.33 \text{ W}**$$

6.1.5. Calculo para el flujo de calor que se pierde en la puerta de entrada y salida del horno.

- Área de la puerta de entrada.



$$A_4 = 3.8 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} = 9.12 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de la puerta } A_5 = 3.5 \text{ m} \times 0.47 \text{ m} = 1.64 \text{ m}^2$$

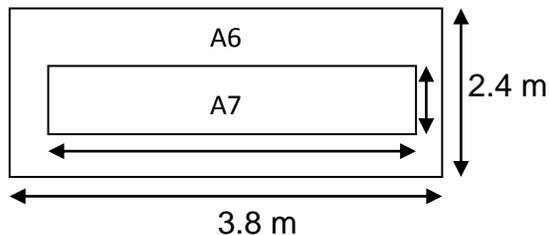
$$\text{Área total de la pared } A_{t3} = A_4 - A_5 = 9.12 \text{ m}^2 - 1.64 \text{ m}^2 = 7.48 \text{ m}^2$$

$$**A_{t3} = 7.48 \text{ m}^2**$$

$$Q = (0.615 \text{ W/m}^2\text{K}) (7.48 \text{ m}^2) (503 \text{ K} - 303 \text{ K})$$

$$**Q = 920.04 \text{ W}**$$

- Área de la puerta de salida.



Área de la puerta de salida similar a la puerta de entrada.

$$A_{t4} = 7.48 \text{ m}^2$$

$$**A_{t4} = 7.48 \text{ m}^2**$$

$$Q = (0.615 \text{ W/m}^2\text{K}) (7.48 \text{ m}^2) (503 \text{ K} - 303 \text{ K})$$

$$**Q = 920.04 \text{ W}**$$

Es importante señalar que al igual que la base de los ventiladores, se asume que la pérdida de calor es uniforme en estas paredes ya que la puerta y la pared están fabricados del mismo material y además poseen el mismo espesor debido a esto se trabaja el área de toda la pared incluyendo la puerta.

6.1.6. Flujo de calor que se pierde por todas las paredes del horno.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{techo}} + Q_{\text{piso}} + Q_{\text{puertas}}$$

$$Q_{\text{total}} = 12458.95 \text{ W} + 9004.83 \text{ W} + 9863.33 \text{ W} + 920.04 \text{ W} + 920.04 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = 33167.19 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = 113746.54 \text{ BTU/h.}$$

6.2. Flujo de calor que absorbe la carga.

Se calcula el calor con la mayor carga que se va a introducir dentro del horno, el calor se calcula asumiendo un proceso adiabático, también que ese es el calor que absorbe la carga en una hora, luego se recalculará el tiempo en que la pieza va a alcanzar la temperatura de trabajo³².

Para medir el flujo de calor que absorbe la carga bajo condiciones determinadas se calcula a partir de la relación:

$$Q = m * C_p * \Delta t$$

Donde:

- C_p es la capacidad calorífica del cuerpo o sistema, J/Kg-K.
- m la masa de sustancia considerada, Kg.
- Δt diferencia de temperaturas, K.

$$Q = (20427 \text{ Kg}) (460 \text{ J/Kg-K}) (503 \text{ K} - 313 \text{ K})$$

$$Q = 1785343636 \text{ J}$$

$$Q = 1785343636 \text{ J/h.}$$

$$Q = 1692166.55 \text{ BTU/h.}$$

6.3. Flujo de calor total que absorbe el horno.

$$Q_{\text{absorbe}} = Q_{\text{carga}} + Q_{\text{total}}$$

$$Q_{\text{absorbe}} = 113746.54 \text{ BTU/h.} + 1692166.55 \text{ BTU/h.}$$

$$Q_{\text{absorbe}} = \mathbf{1805913.09 \text{ BTU/h.}}$$

6.4. Calor de reserva que generan los quemadores.

$$Q_{\text{reserva}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{absorbido}}$$

El tipo de quemadores definido se hizo de acuerdo a catalogo. Y sus características se denotan en la tabla IX.

Tabla IX. Características del quemador.

No. de Modelo Gas	Capacidad. (1000 Btu/h)	Motor Hp	Presión estática del aire (Pa)	Flujo de aire (Nm ³ /h)	Flujo de gas (Nm ³ /h)	Aire en exceso (%)	Emisión de la Llama	Longitud (mm)
PBG 3000	Max.1016	¾	829	589	55.0	10	39:1	1220
	Min. 55		35	121	1.42	770		

Nota: la potencia producida por los tres quemadores que se utilizaran, es lo que se denota como calor de entrada. Y estos trabajaran al 80% de su capacidad.

$$Q_{\text{reserva}} = 3048000 \text{ BTU/h.} - 1805913.09 \text{ BTU/h.}$$

$$Q_{\text{reserva}} = \mathbf{1242086.91 \text{ BTU/h.}}$$

6.5. Eficiencia del horno.

$$Eficiencia = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{Q_{\text{total}}} \times 100$$

$$Eficiencia = \frac{1805913.09 \text{ BTU/h}}{3048000 \text{ BTU/h}} \times 100$$

$$\mathbf{Eficiencia = 60\%}$$

VII. HORNO DE REVENIDO.

7.1. PLANOS DEL HORNO

En la figura 17 se esquematiza la estructura general del horno.

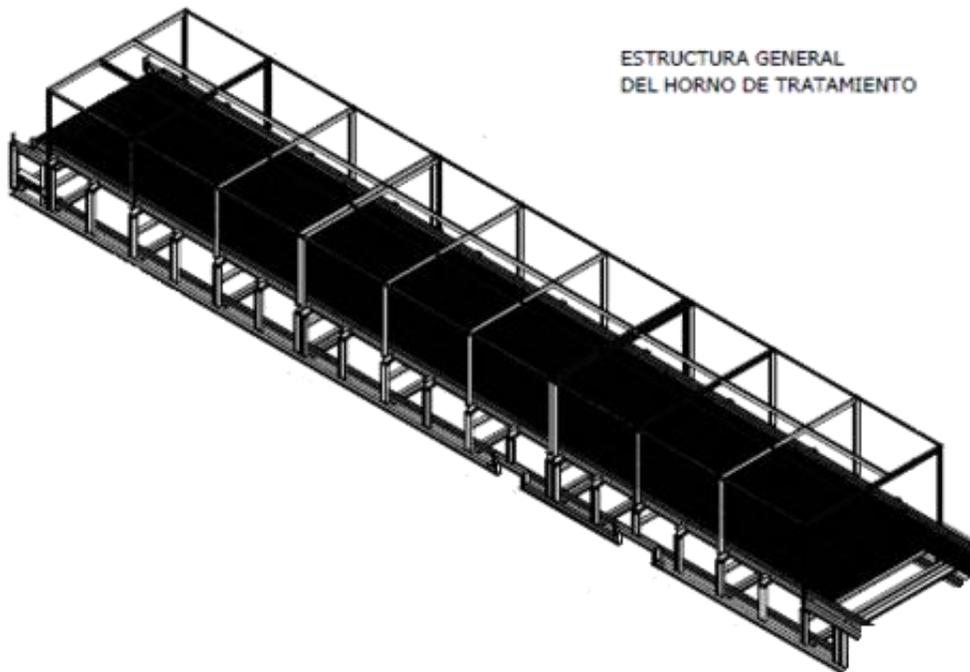


Figura 18. Plano de la estructura del horno.

VIII. SIMULADOR HRG-1.

8.1. Simulador de parámetros y coeficientes convectivos del horno de revenido.

Adjunto con la fabricación del horno de revenido de baja temperatura nos dimos a la tarea de desarrollar un simulador para la implementación de parámetros de trabajo y establecer los diferentes coeficientes convectivos que genera el horno al realizar la convección forzada sobre el producto de acero.⁵⁰

Dicho simulador se presenta en seguida en la tabla IX se muestra el primer apartado del simulador HRG-1.

8.1.1. Primer apartado.

1. Nos muestra las dimensiones de cada ventilador tanto su diámetro en pulgadas, su altura que tiene de acuerdo a su forma o estructura y las revoluciones a las que trabaja cada uno.
2. Posteriormente se denota el cálculo del volumen del cilindro en el cual se consideran las dimensiones del nuestro ventilador.
3. Finalmente una vez plantado el volumen se procede a deducir la cantidad de caudal que generan los 9 ventiladores a 1400 rev/min. En la tabla X se muestra el primer apartado del simulador HRG-1

Tabla X. Cálculo del caudal para cada ventilador.

Caudal por ventilador.						
Ventilador	Diámetro (in)	m	$r = D/2$	h (m)	rev/min	# de vent.
	33.00	0.84	0.42	0.35	1350.00	9.00
Volumen del cilindro	$V = \pi * r^2 * h$		0.19	m^3		
Flujo Volumétrico	Q Total =		2346.55	m^3/min	39.11	m^3/seg

Diagram annotations:

- Diámetro** points to the value 33.00 in the first row.
- Esesor del Ventilador** points to the value 0.35 in the first row.
- Volumen de aire que genera cada Ventilador** points to the value 0.19 in the second row.
- Caudal o Flujo Volumétrico Total** points to the value 39.11 in the third row.

8.1.2. Segundo apartado.

En la tabla XI se esquematiza el segundo apartado del simulador.

1. Se procede a deducir la velocidad del aire dentro del horno, es importante señalar que este aire pasa por una placa (irving) antes de llegar al producto (esferas) de acero y es por ello que se debe contemplar el área y el porcentaje de abertura que tiene esta placa para sí obtener el espacio libre por donde circula el aire⁴⁹.
2. Secuencialmente una vez sabiendo el espacio libre por donde fluye el caudal de aire se procede a conocer la velocidad del mismo empleando el despeje de la velocidad de aire (A) de la formula de Caudal (Q).

Tabla XI. Velocidad del aire sobre el producto.

Velocidad de Aire sobre el Producto					
Placa por dónde pasa el flujo de aire	Largo (m)	Ancho (m)	Espacio libre (%)		
	21.10	3.80	0.16		
Área por donde pasa el flujo volumetrico placa	$A = L * a$	80.18	m ²	12.83	Esp. libre (m ²)
Velocidad del Aire	$V = Q/A$	3.05	m/seg		

Velocidad del aire sobre el producto

8.1.3. Tercer apartado.

En la tabla XII se denota los diversos factores matemáticos que están presentes en la convección forzada.

1. En apartado se realiza los cálculos correspondientes a los coeficientes convectivos al realizar las convección forzada sobre el producto de acero microaleado como son:

- Numero de Reynolds.
- Numero Nusselt R, Tr y Total.
- Coeficiente de convección.
- Numero de Biot
- Tiempo de calentamiento⁴⁶.

Tabla XII. Convección forzada.

Convección Forzada								
Propiedades del Producto (Acero)	D (in)	D (m)	r (m)	V (m ³)	A (m ²)	K (W/m-K)	Densidad ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg-C)
	5.50	0.14	0.07	1.43E-03	0.06	54.00	7860.00	460.00

ΔT (°C)	
40.00	230.00

Numero de Reynolds	Re = V*D/v*ò	50749.61
Nuss R	Nuss R =	134.92
Nuss TR	Nuss TR =	183.53
Nuss Total	Nuss Total = Nuss	318.46
Coeficiente de Convección	h = Nu*(K/D)	61.09
Numero de Biot	Bi = (h*r)/K	0.08
Tiempo de Calentamiento	t =	6282.32

seg	104.71	min
-----	--------	-----

Tiempo total requerido en proceso para alcanzar la temp. deseada

8.1.4. Cuarto Apartado.

La tabla XIII nos muestra los diferentes materiales empleados, así como los valores característicos de cada uno.

- 1- Materiales empleados en la fabricación del horno de revenido de baja temperatura.
- 2- Resistencia térmica de cada material utilizado
- 3- Coeficiente global de transferencia de calor.

Tabla XIII. Materiales empleados para la fabricación del horno.

MATERIALES EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DEL HORNO					
Resistencia Termica					
Materiales	Espesor	k (W/m-K)	R = e/k (W/m ² -K)		
Lamina Ext. CR 14	1.90E-03	50.20	3.78E-05	Σ resistencia térmica de cada material.	
Fibra de Vidrio	7.50E-04	0.05	1.50E-02		
Fibra Ceramica	9.75E-02	0.06	1.61E+00		
Lamina Int. Cr14	1.90E-03	50.20	3.78E-05		
Total Espesores =	0.102	ΣR =	1.63E+00		
Coeficiente Global de	U = 1/ΣR	6.15E-01	W/m ² -K	1.08E-01	BTU/h-ft ² -F

Coeficiente global de transferencia de calor.

8.1.5. Quinto Apartado.

A continuación se muestra en la tabla XIV la capacidad de proceso.

- 1) En esta sección se denota los cálculos que se realizaron para determinar la capacidad de proceso del horno de revenido de baja temperatura. Se estimó una alimentación de 25 bolas por ciclo, en total por claro se realizan 4 ciclos, así mismo se tomó en cuenta que en proceso dentro del horno se tendrán 19 claros, se emplea todo los datos anteriores y el peso promedio de cada bola, para así deducir la capacidad de producción del horno.
- 2) Posteriormente se determina el flujo de calor que absorbe la carga aunado a la capacidad de proceso y la diferencia de temperaturas.

Tabla XIV. Capacidad de proceso.

CAPACIDAD DE PROCESO					
Alimentación	m (kg)	Piezas de acero en cada claro	Capacidad Producción		
25.00	10.70	100.00	20427.27	Capacidad de Producción del Horno	
ΔT (°C)			ΔT (°K)		
40.00	230.00	313.00	503.00		
Capacidad de Proceso		m total=	20427.27	kg	20.43
Capacidad Calorífica		$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta t$	1785343636	J/hr	1692166.55
Piezas de Acero dentro del Horno		$B = (Cap.Pro/m)$	1909.09	Pzas de acero totales	100.00
				Flujo de Calor que absorbe la Carga	
				Pzas en cada claro	

8.1.6. Sexto Apartado.

Las características del horno se demuestran en la tabla XV.

En esta unidad del simulador nos enfocamos a las características del horno como son: paredes, techo, piso y puertas. De cada sección se determina su área.

Tabla XV. Características del horno.

CARACTERISTICAS DEL HORNO										
		Horno Medidas			Medidas del horno			Áreas (m ²)		
		Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)						
		21.1	3.8	2.4						
Seccion										
Techo	A =	80.18	m ²	Base del	0.88	0.88	0.78	(A) Total	73.19	m ²
Piso	A =	80.18	m ²					(A) Total	80.18	m ²
Paredes	A =	101.28	m ²					(A) Total	101.28	m ²
Pared de la	A =	9.12	m ²	Puerta de	3.50	0.47	1.65	(A) Total	7.48	m ²
Pared de la	A =	9.12	m ²	Puerta de	3.50	0.47	1.65	(A) Total	7.48	m ²

Se asume que la pérdida de calor es uniforme en esta pared, ya que la pared y la puerta están fabricados del mismo material y además poseen el mismo espesor debido a esto se trabaja con el área de toda la pared incluyendo la puerta.

8.1.7. Séptimo Apartado.

En esta última sección se calculan los flujos de calor que se pierde. Tomando en cuenta la cantidad generada por los tres quemadores que se utilizan. Este calor generado por los quemadores se emplea como calor de entrada menos el calor absorbido por el horno (que es el calor total + calor absorbe la carga)⁴⁴ .. En la tabla XVI se observa las cantidades de calor absorbido y de reserva que se genera en el proceso de calentamiento.

Tabla XVI. Calor absorbido y de reserva.

Perdidas de Calor									
Quemador		Capacidad (1000 Btu/hr)	Motor (HP)	Presión Estática del	Flow Air (m3/hr)	Flow Gas (m3/hr)	Excess Air (%)	Cobertura del Gas	Flame Length (m)
PBG 3000	Max	1016.00	3/4	829.00	589.00	55.00	10.00	39:1	1.22
	Min	55.00		35.00	121.00	1.42	770.00		
3.00	Total	3048000.00	Total	2487.00	1767.00	165.00	30.00		

ΔT (°C)		ΔT (°K)	
30.00	230.00	303.00	503.00

Numero. de quemadores

Carga Termica	$q = U \cdot A \cdot \Delta t$ (W)
Techo	9004.02
Piso	9863.33
Paredes	12458.95
Puerta Ent.	919.54
Puerta Sal.	919.54
Σ Carga Termica	33165.37
	113740.32 BTU/hr

Calor total que se pierde por las paredes del horno

Flujo de Calor total que Absorbe el Horno	$Q_{\text{absorbe}} = Q_{\text{carga}} + Q_{\text{total}}$	1805906.87	BTU/hr
-------------------------------------------	------------------------------------------------------------	------------	--------

Calor total que absorbe el horno

Nota: La potencia producida por los quemadores es lo que se denota como calor de entrada y se utilizara un caudal de gas 165.00 m3/hr

Flujo de Calor que se genera de mas	$Q_{\text{generado}} = Q_{\text{entrada}}$	1242093.13	BTU/hr
-------------------------------------	--------------------------------------------	------------	--------

Flujo de calor que se genera de reserva

CONCLUSIONES.

Con la elaboración de este trabajo se obtuvo el diseño de un horno de revenido de baja temperatura para el relavado de esfuerzos, sustentando los conocimientos de transferencia de calor por convección forzada.

En el desarrollo se tomó mucha atención en describir todos los requerimientos para llevar a cabo la convección forzada y sus diferentes coeficientes convectivos que conlleva. Así mismo se tomó en cuenta las descripciones establecidas por diseño en términos medibles por medio del análisis funcional para poder realizar el diseño detallado.

De acuerdo a los parámetros determinados se pudieron establecer las condiciones óptimas de trabajo, así como los tiempos y movimientos de producción, además, este diseño debe alcanzar las condiciones necesarias de temperatura para realizar el tratamiento térmico de revenido al producto.

El sistema de calentamiento que se utilizó es de gas natural, esto ayuda a disminuir los gastos ocasionados por el consumo energético. El tiempo de mantenimiento durante el calentamiento en el tratamiento térmico depende sólo de la masa del producto.

Con lo que se cumplió el objetivo de diseñar un horno de revenido de baja temperatura para el relevado de esfuerzos, empleando los conocimientos de ingeniería para contribuir en la creación de tecnología en el ramo de la termodinámica.

Se escogió para el revestimiento del horno solo fibra cerámica y no ladrillos, debido a que los ladrillos absorben mayor flujo de calor que la fibra cerámica y así poder disminuir las pérdidas que se generan a través de las paredes del horno.

La eficiencia del horno se puede aumentar controlando la temperatura a la salida del temple y a la entrada del horno de revenido, una temperatura óptima de entrada al horno se definió entre los 40°C. También tendremos mayor eficiencia precalentando el aire para la combustión.

El trabajo a futuro deja la optimización del horno así como su automatización con lo cual reducirá el tiempo y costo de operación

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Blasius, H (1908)., Math. Phys., 56, 1. Traducción inglesa en National Advisory Committee for Aeronautics Technical Memo, num. 1256.
2. Mc Graw Hill. Avner, S.H. (1985), Introducción a la Metalurgia Física, 252-258 pag.2da ed. México.
3. Incropera, Frank P., De Witt, David P.(1999), Fundamentos de Transferencia de Calor, 4a ed. PRENTICE HALL, México.
4. Hans, Dieter Baehr., Stephan Karl. (1983), Heat and Mass Transfer, 3ra ed., Nueva York.
5. Schlichting, H. (1960), Boundary Layer Theory, 4a ed., McGraw-Hill, Nueva York,
6. Kays, W. M. y M. E. Crawford (1980), Convective Heat and Mass Transfer, MacGraw-Hill, Nueva York.
7. Schlichting, H. (1968), Boundary Layer Theory, 6a ed., McGraw-Hill, Nueva York.
8. Fox, R., W. y A. T. McDonald, (1985). Introduction to Fluid Mechanics, 3a ed., Wiley, Nueva York.
9. Knudsen, J. D. y D. L. Katz, (1958).Fluid Dynamics and Heat Transfer, McGraw-Hill, Nueva York.
- 10.Zhukauskas, A. (1972). "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow", en J. P. Hartnett y T. F. Irvine, Jr., eds., Advances in Heat Transfer, vol. 8, Academic Press, Nueva York.
- 11.Morgan, V. T. (1975). "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders", en T. F. Irvine Jr. y J. P. Hartnett, eds., Advances in Heat Transfer, vol. 11, Academic Press, Nueva York.
- 12.Martin, H. (1977). "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", en J. P., Hartnett y T. F. Irvine, Jr., eds., Advances in Heat Transfer, vol. 13, Academic Press, Nueva York.

13. Popiel, Cz. O. y L. Bogusiawski, (1986). "Mass or Heat Transfer in Impinging Single Round Jets Emitted by a Bell-Shaped Nozzle and Sharp-Ended Orifice", en C. L. Tien, V. P. Carey y J. K. Ferrell, eds., Heat Transfer 1986, vol 3, Hemisphere Publishing, Nueva York.
14. Golstein, R. J., A. I. Behbahani y K. K. Heppelman, (1957). Int. J. Heat Transfer, Vol. 2, Wiley, Nueva York.
15. Geankoplis, C. (1972). J. Mass Transport Phenomena, Holt, Rinehart & Winston, Nueva York.
16. Bird, R. B., W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, (1957). Transport Phenomena, Wiley, Nueva York.
17. Webb, R. L. (1993). Principles of Enhanced Heat Transfer, Wiley, Nueva York.
18. Kays, W. M.; y M. E. Crawford, (1980). Convective Heat and Mass Transfer; McGraw-Hill, Nueva York.
19. Petukhov, B. S., en T. F. Irvine y J. P. Hartnett, (1970). eds., Advances in Heat Transfer, vol. 6, Academic Press, Nueva York.
20. Sherwood, T. K., R. L. Pigford y C. R. Wilkie, (1975). Mass Transfer, McGraw-Hill, Nueva York.
21. Shah, R. K., y S. D. Joshi, (1987). Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer; cap. 5, Wiley-Interscience, Nueva York.
22. Bird, R. B., W. E. Stewart, y E. N. Lightfoot, (1966). Transport Phenomena, Wiley, Nueva York.
23. Bergles, A. E. (1981). "Principles of Heat Transfer Augmentation", Heat Exchangers, Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design, Hemisphere Publishing, pp. 819-842. Nueva York.
24. Webb, R. L., en S. Kakac, R. K. Shah, y W. Aung, (1987). eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, cap. 17, Wiley-Interscience, Nueva York.

25. Skupinski, E. S., J. Tortel, y L. Vautre, (1965). Int. J. Heat Mass Transfer; 8, 937.
26. Howarth, L. (1938), Proc. R. Lond., Ser. A, 164, 547.
27. Pohlhausen, E., Z. Angew (1921), Math. Mech., 1, 115.
28. Churchill, S. W. y H. Ozoe, J.(1973),Heat Transfer, 95, 78.
29. Whitaker, S. (1972), AIChE J., 18, 361.
30. Zhukauskas, A. B. Ambrazyavichyus (1961), Int. J. Heat Mass Transfer, 3, 305.
31. Churchill, S. W. (1976), AIChE J., 22, 264..
32. Blair, M. F. (1983), J. Heat Transfer, 105, 33 y 41.
33. Jakob, M. (1949). Heat Transfer, vol. 1, Wiley, Nueva York.
34. Hilpert, R. (1933), Forced. Heat. Engineers., 4, 215.
35. Churchill, S. W. y M. Berstein, (1977) .J. Heat Transfer, 99, 300.
36. Ranz, W. y W. Marshall, (1952). Chemical. Engineer. Pro., 48, 141.
37. Grimison, E. D. (1937), Transfer. ASME, 59, 583.
38. Kays, W. M. y Robert. Kenn. Lo, (1952). Stanford University Technical Report, num. 15.
39. Goldstein, R. J. y J. F. Timmers, (1982). Int. J. Heat Mass Transfer, 25.
40. Hollworth, B. R. y L. R. Gero, (1985). J. Heat Transfer, 107,910.
41. Jakob, M. (1957). Heat Transfer, Vol. 2, Wiley, Nueva York.
42. Langfaar, H. L. Appl. Mech., 64, A-55, 1942
43. Moody, L. F., Trans. ASME, 66, 671, 1944.

44. Wark, K., Thermodynamics, (1983). 4a ed., McGraw-Hill, Nueva York.
45. Kays, W. M., y H. C. Perkins, en W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, y E. N. Ganic, (1985). eds., Handbook of Heat Transfer, Fundamentals, cap. 7, McGraw-Hill, Nueva York,
46. Reed, C. B., en S. Kakac, R. K. Shah y W. Aung (1987). eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, cap. 8, Wiley-Interscience, Nueva York,
47. Shah, R. A., y T. T. Shimazaki, (1951). Transfer. ASME, 73, 803.
48. Molki, M., y E. M. Sparrow, J (1986). Heat Transfer; 108, 482.
49. Norris, R. H., en A. E. Bergles y R. L. Webb, 1970. Eds. Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer, ASME, Nueva York.
50. Kakac, S., en S. Kakac, R. K. Shah y W. Aung (1987). eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, cap. 18 Wiley-Interscience, Nueva York.
51. Ginielinski, V. (1976)., Int. Chem. Eng., 16, 359.
52. Bhatti, M. S., y R. K. Shah, in S. Kakac, R. K. S. Shah, y W. Aung, (1987). eds., Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer, cap. 4, Wiley-Interscience, Nueva York.
53. Dittus, F. W., y L. M. K. Boelter, (1930). University of California, Berkeley, Publications on Engineering, Vol. 2, p. 443.
54. Colburn, A. P. (1933)., Trans, AIChE, 29, 174.
55. Shah, R. K., y M. S. Bhatti, en S. Kakac, R. K. Shah, y W. Aung, (1987). eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, cap. 3, Wiley-Interscience, Nueva York.

Paginas Web

1. www.engineeringtoolbox.com/air-properties_d_156.html. (consultada el 06/07/2014).
2. www.quimitube.com/termodinamica-teor-4-transferencia-energía.(consultada 06/07/2014).
3. <http://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2012/01/tema-3-conveccion.pdf>.(consultada 17/07/2014).
4. <http://www.upv.es/upl/U0296622.pdf>.(consultada 22/07/2014).
5. <http://www.jhg.cl/Documentos/Diplomado/Clase%202.pdf>. (consultada 01/08/2014).
6. <http://www.solerpalau.es/es-es/hojas-tecnicas>. (consultada 07/08/2014).
7. <http://www.salvadorescoda.com/tecnico/ve/Manual-Ventilacion.pdf>. (consultada 12/08/2014).
8. <http://personales.unican.es/rene/doc/Trasp%20WEB/Trasp%20Sist%20Ener/04%20Ventiladores.pdf>. (consultada 12/08/2014).
9. http://www.greenheck.com/es/pdf/fan_fundamentals_spanish.pdf. (consultada 13/08/2014).