

129



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

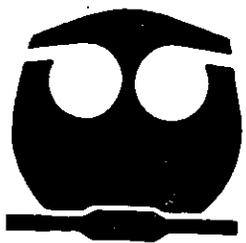


EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA

EVALUACION INTEGRAL, DIMENSIONAMIENTO TERMODINAMICO Y SELECCION DE MATERIALES PARA CALENTADORES ELECTRICOS INDUSTRIALES.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
JUAN MANUEL REYNA GONZALEZ

129



MEXICO, D. F.

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

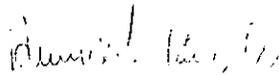
**Jurado asignado:**

Presidente: Prof. Humberto Rangel Dávalos.  
Vocal: Prof. José Luis López Martínez.  
Secretario: Prof. Pablo Sandoval y González.  
Primer suplente. Prof. José Sabino Samano Castillo.  
Segundo suplente. Prof. Gabriel Pérez Baldomero.

**Sitio donde se desarrolló el tema:**

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

**Asesor del tema:**



Ing. Humberto Rangel Dávalos

**Supervisor técnico:**



Ing. Ramiro Sandoval Marin

**Sustentante:**



Juan Manuel Reyna González

Agradecimientos.

A mi padre **Manuel Reyna Villalobos** (†).

Porque me enseñaste a luchar en la vida, inculcándome valores que me han ayudado a no desfallecer aún en los momentos más difíciles de mi existencia. Te agradezco infinitamente, estés en donde estés, el haberme brindado siempre tu apoyo y comprensión.

### **QUE COSTUMBRE TAN SALVAJE**

¡Que costumbre tan salvaje esta de enterrar a los muertos!

¡De matarlos, de aniquilarlos, de borrarlos de la tierra!

Es tratarlos alevosamente, es negarles la posibilidad de revivir.

Yo siempre estoy esperando a que los muertos se levanten

que rompan el ataúd y digan alegremente: ¿Por qué lloras?.

Por eso me sobrecoge el entierro, aseguran las tapas de la caja

la introducen, le ponen lajas encima y luego tierra

tras, tras, tras, paletada tras paletada, terrones, polvo, piedras

apisonando, amacizando, ahí te quedas, de aquí no sales.

Me dan risa, luego, las coronas, las flores, el llanto, los besos derramados.

Es una burla: ¿para qué lo enterraron?

¿Por qué no lo dejaron fuera hasta secarse?

Hasta que nos hablaran sus huesos de su muerte

¿O por qué no quemarlo, o darlo a los animales, o tirarlo a un río?

Había de tener una casa de reposo para los muertos

ventilada, limpia, con música y con agua corriente.

Lo menos dos o tres, cada día se levantarían a vivir.

Descansa en paz Papá, y gracias por haber sido mi padre.

A mi madre **Yolanda V. González Bielma**.

Gracias por enseñarme a tener una gran fortaleza cuando nos enfrentamos a situaciones irreparables, por brindarme tu apoyo, amor y comprensión. Te quiero por creer en mí, escuchándome y orientándome cuando más te necesito, pero también te amo, primero por ser mi madre, y después por ser una gran mujer.

### **ALMOHADAS**

Hay almohadas de pluma  
hay almohadas de siesta  
de lana, de vientre, de muerte  
pero no todas están en el secreto  
ni todas saben evacuar las consultas  
la tuya tiene un pozo donde ajustas la nuca  
y en las noches amargas hundes ojos y lágrimas.

A mis tres adoraciones: **Alma, Mónica y Fabiola**.

Les doy las gracias porque a pesar de las diferencias que puedan existir, nos hemos mantenido unidos, y me han brindado su respaldo incondicional día con día. Las quiero como no tienen idea, y espero que con el tiempo logremos incrementar nuestra confianza y nuestro cariño entre nosotros mismos y hacia nuestra madre.

A mis familiares y amigos.

Porque la confianza y la amistad que me han otorgado, me ayuda a seguir adelante.

Un agradecimiento muy especial a las familias **Gómez González** y **Benítez Martínez**, por haberme dado su apoyo durante mi estancia en la Ciudad de México.

**Al Instituto Mexicano del Petróleo.**

Por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo este trabajo en sus instalaciones.

A todo el departamento de la división de Ingeniería Térmica y a mis compañeros becarios.

Por el buen trato que me dieron durante el año que estuve colaborando con ellos.

Con agradecimientos muy especiales a:

Ing. Humberto Rangel Dávalos.

Por depositar su confianza en mi persona para realizar esta tesis.

Ing. Ramiro Sandoval Marín.

Por su trato amable durante mi estancia en el I.M.P., y por orientarme y ayudarme con el desarrollo de la tesis.

Ing. Rolando Ruiz Grimaldo, Ing. Gerardo Morales y al Dr. Miguel Angel Toral.

Por el apoyo y la amabilidad con la que me trataron dentro y fuera del Instituto.

## INDICE

<b>I</b>	<b>OBJETIVO E INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>GENERALIDADES</b>	<b>4</b>
2.1	Calentadores por combustión	9
2.2	Calentamiento con resistencias	11
2.3	Calentamiento por inducción	15
2.4	Calentamiento dieléctrico	17
2.5	Resistencia térmica y la analogía eléctrica	20
2.6	Coefficiente de transferencia de calor total	30
2.7	Generación de calor interna	34
<b>III</b>	<b>TIPOS DE CALENTADORES DE PROCESO</b>	<b>43</b>
3.1	Cambiadores de un solo tubo	44
3.2	Cambiadores de tubos múltiples	45
3.3	Calentamiento externo	46
3.4	Cambiadores de placas	47
3.5	Equipos especiales	47
3.6	Cambiadores de contacto directo	48
3.7	Equipos para fusión de sólidos	48
3.8	Equipos para la desecación de sólidos	49
<b>IV</b>	<b>TIPOS DE CALENTADORES ELECTRICOS</b>	<b>52</b>
4.1	Cables de calentamiento	53
4.2	Cables de tira	56
4.3	Calentadores de cartucho	58

4.4	Calentadores tubulares	59
4.5	Calentadores de inmersión	60
4.6	Calentadores de circulación	61
4.7	Calentadores de banda	62
<b>V</b>	<b>SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCION</b>	<b>63</b>
5.1	Factores que intervienen en la selección de materiales	64
5.2	Selección del material para los elementos principales	67
5.3	Falla en los calentadores eléctricos	71
<b>VI</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO TERMODINAMICO</b>	<b>75</b>
6.1	Calor perdido	79
6.2	Especificación del sistema	83
6.3	Aplicación	96
<b>VII</b>	<b>CONCLUSIONES, ANEXOS Y BIBLIOGRAFIA</b>	<b>100</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO I</b> Nomenclatura y factores de conversión	<b>102</b>
	<b>ANEXO II</b> Tablas	<b>107</b>
	<b>ANEXO III</b> Gráficas	<b>125</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>142</b>

# **CAPITULO I**

## **OBJETIVO E INTRODUCCION**

## OBJETIVO

Desarrollar una secuencia general de cálculo para especificar los diferentes tipos de calentadores eléctricos que existen en la industria, haciendo una integración de la información proporcionada por diferentes proveedores.

## INTRODUCCION

La transferencia de calor es una operación esencial para la industria de proceso en general, lo cual puede notarse por el hecho de que en algunos casos los cambiadores de calor llegan a requerir más de la tercera parte de la inversión total en equipo. Tradicionalmente, las industrias dependen de equipo de calentamiento y/o combustión directo o indirecto para secar, calentar, calcinar, fundir y para el proceso químico en general. Los equipos de combustión de fuego directo son aquellos en que la llama y/o los productos de combustión se utilizan para obtener algún resultado deseado por contacto directo con otro material, los equipos más comunes para este tipo de calentamiento son los hornos giratorios, los hornos de hogar abierto, los evaporadores de combustión sumergida y los calentadores de proceso. En los equipos de combustión de fuego indirecto, la llama y los productos de combustión se separan de todo contacto con el material principal en el proceso mediante paredes metálicas o refractarias. Algunos de estos equipos de calentamiento indirecto son: las calderas de vapor, los vaporizadores, los rehervidores, los intercambiadores de calor y los crisoles de fusión.

Hoy en día, el calentamiento eléctrico puede ser aplicado con una alta efectividad en casi todos los lugares en donde se requiera energía térmica. El calentamiento eléctrico no está limitado o restringido por consideraciones ambientales, y frecuentemente es la única solución a este tipo de problema. En la mayoría de los productos hechos en la industria por el ser humano, se requiere la adición térmica en alguna parte del proceso de fabricación, por este motivo, la energía eléctrica está teniendo una aplicación potencial en este campo. Una de las mayores ventajas del calentamiento eléctrico es su alta eficiencia, esto suele ser cierto para la eficiencia

eléctrica, que es el porcentaje de energía eléctrica convertida en calor útil, lo que significa que hay menos calor desperdiciado en la planta del usuario. Sin embargo, la generación de energía eléctrica a partir de un combustible fósil sólo proporciona una eficiencia del 30%; por ello las eficiencias globales del calentamiento eléctrico varían desde el 15% en una aplicación de calentamiento dieléctrico hasta el 30% para aplicaciones de calentamiento directo con resistencias.

El calentamiento eléctrico industrial puede dividirse en tres categorías básicas: calentamiento con resistencias, indirecto y directo; calentamiento por inducción y calentamiento dieléctrico. El calentamiento con resistencias se refiere a la generación de calor de acuerdo con la ley de Joule, es decir, a las pérdidas  $I^2R$  en materiales conductores de electricidad cuando pasa una corriente a través de ellos por contacto directo. El calentamiento por inducción se rige también por  $I^2R$ , pero la corriente es inducida en el conductor mediante un campo magnético alternativo. El calentamiento dieléctrico es la generación de calor en un material no conductor colocándolo en el campo eléctrico alternativo con los mecanismos de calentamiento basados en las pérdidas ocasionadas por la rotación de un dipolo. En general, el calentamiento directo con resistencias es el que se emplea más a menudo para el calentamiento de fluidos de proceso en la explotación del petróleo, el calentamiento de barras y lingotes antes de rolar o forjar el material, para la fundición de vidrio en combinación con otra fuente de calor, en hervidores para agua caliente, y en baños salinos para el tratamiento térmico de metales. El calentamiento indirecto con resistencias en estufas y hornos tiene muchas aplicaciones, desde el secado hasta la fundición. El calentamiento por inducción se utiliza para calentar metales que serán sometidos a fundición o forjado, soldadura y endurecimiento, así como en diversas aplicaciones menos frecuentes. El calentamiento dieléctrico se aplica en el secado de muchos materiales, desde madera hasta alimentos, y para el procesamiento de materiales plásticos.

## **CAPITULO II**

### **GENERALIDADES**

Todos los equipos de calentamiento directo o indirecto, presentan al menos uno de los tres tipos fundamentales de transferencia de calor, los cuales son: conducción, convección y radiación.

**Conducción.** Es la transferencia de calor desde una parte de un cuerpo a otra del mismo cuerpo, o bien, desde un cuerpo a otro que esté en contacto físico con él, sin desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo. Los fundamentos de la conducción de calor se atribuyen generalmente a Fourier. En muchos sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor o flujo de electricidad, se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, o

$$\text{Flujo} \propto \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}} \quad (2.1)$$

En un circuito eléctrico las aplicaciones más simples son expresadas por la ley de Ohm (ecuación 2.13): el voltaje en el circuito es el potencial y la dificultad con la que los electrones emigran por el alambre, es la resistencia. En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías. Recíprocamente, de la ecuación (2.1), cuando dos superficies que tienen un área  $A$  de una pared de espesor  $\Delta x$  están a diferente temperatura, necesariamente existe un flujo y una resistencia al flujo de calor. La conductancia es la recíproca de la resistencia al flujo de calor, y la ecuación (2.1) puede expresarse por .

$$\text{Flujo} \propto \text{conductancia} \times \text{potencial} \quad (2.2)$$

o bien, como

$$Q_t \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.3)$$

donde  $Q_t$  es la transferencia de calor,  $A$  es el área superficial, y  $\Delta T/\Delta x$  es el gradiente de temperatura en la pared. Las unidades de  $Q_t$  en el Sistema Internacional son los watts (W), y en el Sistema Inglés son las unidades térmicas británicas por hora (Btu/h).

Introduciendo una constante de proporcionalidad  $k$  en la ecuación (2.3) para convertirla en una igualdad

$$Q_t = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

ésta relación obtenida es conocida como la ley de Fourier de conducción del calor. El signo menos que se introdujo en las ecuaciones (2.3) y (2.4), es para establecer la dirección del flujo de calor de la superficie con mayor temperatura a la superficie con menor temperatura. La constante de proporcionalidad,  $k$ , es llamada conductividad térmica del material, las unidades para la conductividad térmica en el Sistema Internacional son  $W/m\cdot K$ , y en el Sistema Inglés son  $Btu/h\cdot pie\cdot R$ . En algunas ocasiones la ley de Fourier se puede escribir en forma diferente de la ec.(2.4), si dividimos ambos lados de dicha ecuación entre el área  $A$ , obtenemos

$$q = \frac{Q_t}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

donde  $q$  es llamada flux de calor. El flux de calor es la transferencia de calor que ocurre sobre un área unitaria, y sus unidades en el Sistema Internacional son  $W/m^2$ , y en el Sistema Inglés son  $Btu/pie^2$ .

**Convección.** Es la transferencia de calor desde un punto a otro, dentro de un fluido, un gas o un líquido, mediante la mezcla de una porción del fluido con otra. En la convección natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura; en la convección forzada, el movimiento se produce por medios mecánicos. Cuando la velocidad forzada es relativamente baja, se debe entender que los factores de convección libre como las diferencias de temperatura y densidad, pueden tener una influencia importante. La transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y al área de la superficie, esto puede ser expresado matemáticamente como

$$Q_t \propto A(T_w - T_\infty) \quad (2.6)$$

si introducimos una constante de proporcionalidad,  $h$ , para hacer de la ecuación (2.6) una igualdad

$$Q_t = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) es conocida como la ley de enfriamiento de Newton. La constante de proporcionalidad,  $h$ , es llamada coeficiente de transferencia de calor y tiene unidades de  $W/m^2K$  en el SI y de  $Btu/h\text{pie}^2\text{oR}$  en el Sistema Inglés. En muchas situaciones, la temperatura del fluido,  $T_w$ , es mucho más alta que la temperatura de la pared,  $T_s$ , en ese caso la ley de enfriamiento de Newton se escribe como

$$Q_t = hA(T_w - T_s) \quad (2.8)$$

para mantener la transferencia de calor positiva.

**Radiación.** Es la transferencia de energía térmica por ondas electromagnéticas, las cuales pueden viajar a través del vacío, por lo cual no necesitan un medio de difusión. La radiación térmica es primeramente un fenómeno superficial. Cuando la radiación térmica golpea una superficie, una fracción de la radiación incidente es reflejada, una fracción es absorbida, y otra fracción es transmitida. Todos los cuerpos con una temperatura superficial por encima del cero absoluto emiten radiación térmica, la radiación máxima que un cuerpo puede emitir está dada por la relación

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.9)$$

La ecuación (2.9) es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann. Un cuerpo que emite radiación de su superficie de acuerdo con esta ley es llamado cuerpo negro, el cual es un radiador ideal de la energía térmica. El cuerpo negro es una idealización, es un estándar con el cual las superficies reales son comparadas, el poder emisivo,  $E$ , de una superficie real está dado por la relación

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.10)$$

donde  $\varepsilon$  = emisividad. La emisividad es una propiedad de la superficie que es usada para comparar el poder de emisividad de una superficie real con una de un cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad es un número adimensional que varía entre 0 y 1, por lo tanto, una superficie real emite menos energía que un cuerpo negro a la misma temperatura.

Los tres tipos de transferencia de calor se pueden producir al mismo tiempo y es aconsejable tomar en consideración la transferencia de calor por cada uno de esos tipos en cada caso particular. La transferencia de calor por convección forzada es el modo que se utiliza con mayor frecuencia en las industrias de proceso. Se bombean fluidos calientes y fríos, separados por una frontera sólida, a través del equipo de transferencia de calor, con una velocidad de transferencia de calor que es función de las propiedades físicas de los fluidos, las velocidades de flujo y la forma geométrica del sistema. En general, el flujo es turbulento y el conducto de flujo varía en su complejidad de tubos circulares a cambiadores de calor con desviadores y de superficies extendidas. Los cambiadores de doble tubo se utilizan de manera preferencial para flujos bajos y altas temperaturas, las secciones de doble tubo permiten un flujo verdadero a contracorriente, especialmente ventajoso para grandes intervalos de temperaturas del fluido y cuando se requiere un acercamiento estrecho en las temperaturas de los fluidos. Los cambiadores del tipo de coraza y tubo, como los rehedidores de caldera, los evaporadores, etc., constituyen la parte más importante de los equipos de transferencia de calor sin combustión en las plantas de procesos químicos. Entre sus aplicaciones están la de reducir la viscosidad de combustibles pesados, alquitrán, melasas y fluidos similares para que puedan bombearse adecuadamente. En el cambiador de placa en espiral los sólidos pueden mantenerse en suspensión, y se produce una turbulencia con un número de Reynolds más bajo que en el caso de los tubos rectos.

Los cables de calentamiento eléctrico son usados para contrarrestar las pérdidas de calor de los equipos de proceso y de las tuberías a través del aislante, ya que dichas pérdidas de calor pueden traer consigo consecuencias inaceptables, tales como: el congelamiento en líneas de agua de enfriamiento, líneas de retorno de vapor o condensado, líneas de protección contra fuego, líneas de aire comprimido, tanques de almacenamiento, válvulas, etc. Además, estos cables de calentamiento se suelen utilizar para mantener la temperatura en líneas de vapor, plantas de asfalto y áreas de procesamiento químico y petroquímico. Los calentadores eléctricos tipo tira son empleados principalmente para el calentamiento de aire por convección y para el calentamiento de tanques, moldes, etc., por conducción y convección.

Los calentadores eléctricos tipo cartucho se ocupan frecuentemente para el calentamiento de moldes o placas sólidas insertándolos en orificios perforados, los calentadores tubulares, de inmersión y de circulación para el calentamiento de gases y líquidos (agua, aceites, fluidos de transferencia de calor y soluciones corrosivas), y los calentadores de banda están diseñados específicamente para aplicar calor por convección a superficies cilíndricas.

## **2.1 Calentadores por combustión.**

Los requisitos para la industria de proceso para calentadores por combustión se dividen en media docena de categorías de servicio general.

**Recalentadores de columna.** La carga tomada de una columna de destilación es un líquido recirculante que es vaporizado parcialmente en el recalentador. La corriente del líquido y vapor mezclados, vuelve a entrar en la columna donde el vapor se condensa y libera su calor de vaporización. Según la aplicación específica, la temperatura del recalentador o hervidor se encuentra en el intervalo de 477K a 561K.

**Precaentadores de alimentación para columnas de fraccionamiento.** La carga (por lo general solo líquido, aunque algunas alimentaciones pueden contener una cantidad nominal de vapor de entrada) se envía al calentador por combustión, seguido de un precalentamiento en el equipo que no se somete a calentamiento por combustión. Un ejemplo claro de este tipo de servicios es un calentador de la alimentación a una columna de destilación atmosférica en una refinería de petróleo.

**Precaentadores de alimentación al reactor.** Los calentadores por combustión elevan la temperatura de la carga al nivel necesario para controlar una reacción química que tiene lugar en un recipiente adyacente. La naturaleza de la carga y la presión y temperatura de operación del calentador pueden variar considerablemente, según el proceso. Los ejemplos que se citan a continuación muestran la diversidad de aplicaciones para los precaentadores de alimentación a los reactores.

- a) Calentamiento de componentes sencillos en una fase, por ejemplo, vapor sobrecalentado en las secciones de reacción del proceso de fabricación de estireno.
- b) Calentamiento de componentes múltiples en una fase sencilla, como las mezclas de hidrocarburos vaporizados y gas hidrógeno de recirculación, antes del proceso de reformación catalítica en una refinería.
- c) Calentamiento de componentes múltiples en fase mezclada, como el calentamiento de mezclas de hidrocarburos líquidos y gas hidrógeno recirculado para reacción en una refinería de hidrofraccionamiento.

**Calor suministrado al medio de transferencia de calor.** Un calentador por combustión se emplea por lo general para elevar la temperatura del medio de recirculación, que suele ser un aceite térmico: Dowtherm, Therminol, sales fundidas, etc. Los fluidos que pasan por el calentador en estos sistemas permanecen casi siempre en fase líquida a lo largo de todo el recorrido.

**Calor suministrado a flujos viscosos.** A menudo es necesario bombear aceite pesado de un lugar a otro dentro del proceso. Cuando este fluido se encuentra a baja temperatura, puede tener una viscosidad tan alta que sea prácticamente imposible bombearlo, razón por la que se acude al calentamiento de este fluido para facilitar su bombeo.

**Reactores por combustión.** En esta categoría se encuentran los calentadores en que ocurre una reacción química dentro del serpentín.

- a) Calentadores de vapor para reformadores de hidrocarburos, donde los tubos de la cámara de combustión funcionan individualmente como recipientes de reacción vertical, llenados con catalizador de níquel.
- b) Calentadores para pirólisis, empleados para producir olefinas a partir de cargas gaseosas como etano y propano y cargas líquidas como nafta y gasóleo.

## 2.2 Calentamiento con resistencias.

Los calentadores eléctricos consisten de resistencias eléctricas, las cuales están conformadas por alambres embebidos en un material refractario que luego se protege por una cubierta metálica. Las leyes que gobiernan al calentamiento de las resistencias eléctricas, despreciando el efecto de la resistencia en el circuito son la ley de Ohm y la ley de Joule. En el calentamiento por resistencia eléctrica el elemento es capaz de alcanzar alta temperatura, la temperatura más alta alcanzada por este tipo de calentador es aquella que causa que la energía en forma de calor se disipe a la misma velocidad que se produce. Para evitar que el elemento se quemé, el fluido frío o sólido debe ser capaz de recibir calor a una velocidad tal que mantenga a la envoltura metálica por debajo de la máxima temperatura permisible, es decir, el diseño de elementos eléctricos está condicionado por el flujo térmico que puede disiparse en el material frío. El flujo térmico es la energía cedida en Joule por hora por metro cuadrado de superficie, y en unidades eléctricas se expresa en watts por metro cuadrado de la superficie del elemento. La razón a la que la energía eléctrica se convierte en calor está dada por  $I^2R$ , estas pérdidas por resistencia en conductores son por lo general indeseables, aunque pueden llegar a ser convenientes cuando el conductor debe someterse a calentamiento.

### Calentamiento directo.

Este método se emplea en la industria petroquímica cuando utilizamos calentadores eléctricos tubulares, de inmersión o de circulación, para calentar los fluidos de proceso en la explotación del petróleo. También se utiliza en la industria del hierro y el acero para precalentar barras y lingotes antes de ser sometidos a rolado o forjado y templado de las mismas piezas. Para que los lingotes tengan un calentamiento eficiente deberán tener una longitud mucho mayor que el diámetro; por otra parte, las pérdidas relativas de calor mediante contacto serán grandes. Cuando se trata de metales de baja resistencia como el cobre, la relación  $L/D$  debería ser mayor de diez, cuando se trata de metales de alta resistencia como el acero, la relación  $L/D$  puede ser menor. Las secciones transversales de las barras deberían ser uniformes, para que el calentamiento también lo sea. La energía suministrada para el calentamiento directo por resistencias puede ser trifásica o monofásica, proviene básicamente de

transformadores de reducción y contactores con capacitores para corrección del factor de potencia, incluidos con mucha frecuencia. El sistema completo debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las fuerzas entre los conductores de alta tensión en los cuales las corrientes del orden de  $10^5$  A no son desconocidos en el circuito de carga. Los contactos a través de los que se transfiere la corriente son los que presentan más problemas para su diseño, las grandes áreas de contacto y por consiguiente de baja resistencia, son buenas liberadoras de calor y producen terminales frías. Las pequeñas áreas de contacto con poco escape de calor tienen una resistencia alta y ocasionan pérdidas de potencia y sobrecalentamiento local, los contactos deben soportar con frecuencia esta carga. El calentamiento por resistencia de contacto directo, se utiliza también con frecuencia para líquidos como vidrio o sales fundidos, el vidrio que funde a temperaturas superiores a 1373K (2012°F) y tiene una resistividad suficientemente baja para el calentamiento directo, es una aplicación importante; la corriente se pasa entre electrodos inmersos en la fundición, que deben soportar altas temperaturas y el movimiento de la fundición, los electrodos que se emplean normalmente son de molibdeno u óxido de estaño. Los baños de sal que se utilizan para el tratamiento de metales presentan problemas similares respecto a los electrodos, casi siempre se emplea grafito o acero resistente a la corrosión.

### **Calentamiento indirecto.**

Entre los factores que afectan la selección de calentamiento indirecto con resistencias se incluyen el coeficiente de resistencia a la temperatura, resistencia a la deformación, condiciones atmosféricas, resistencia al choque térmico y necesidad de alta resistividad. Los elementos de calentamiento industrial para usarse en aire caen dentro de una clasificación de cuatro grupos: a base de níquel y a base de hierro, para elementos metálicos; carburo de silicio y disiliciuro de molibdeno para elementos no metálicos. Los elementos que más se utilizan son a base de níquel y están formados por 80% de níquel y 20% de cromo; generalmente se recomiendan para la operación a la temperatura máxima de 1473K (2192°F). Estos elementos forman un recubrimiento de óxido de cromo que protege el material de la oxidación excesiva, sin embargo, no se recomiendan para su empleo en hornos atmosféricos,

debido a las trazas de azufre que se forman a causa de la baja temperatura que se requiere para que este elemento reaccione con el níquel. Cuando se necesitan elementos que soporten temperaturas ligeramente mayores, hasta 1648K (2500°F) se recomienda utilizar aleaciones a base de hierro, que consisten principalmente en hierro, cromo y aluminio. El aluminio se oxida y forma una película delgada de alúmina que protege al material de la oxidación subsecuente, estas aleaciones, al igual que las correspondientes a la serie de níquel-cromo, pueden moldearse fácilmente y formar serpentines o barras curvadas. Cuando se requieren elementos para temperaturas superiores a 1648K (2500°F) es necesario utilizar materiales no metálicos, pueden emplearse elementos de carburo de silicio cuando las temperaturas tengan un valor máximo de 1873K (2912°F). Estos elementos se fabrican en forma de barras rectas, con cortes en espiral en ciertos casos, una de las características del carburo de silicio es que incrementa su resistencia con el tiempo, con lo que se hace necesario utilizar equipo eléctrico que proporcione diversos voltajes. Otro tipo de elemento no metálico es el disilicuro de molibdeno, que proporciona temperaturas de hasta 1973K (3092°F) al tiempo que se evitan los problemas de envejecimiento del carburo de silicio, estos elementos se obtienen mediante una mezcla que contiene 90% de  $\text{MoSi}_2$  y 10% de aditivos de cerámica. Los elementos de esta clase se reblandecen a altas temperaturas, por lo que su forma general es en U.

Los calentadores por resistencia se utilizan en muchas aplicaciones a temperaturas relativamente bajas en las que el contacto directo se hace con el elemento aislado, entre sus aplicaciones se incluyen desde las correspondientes al sellado de plásticos hasta la fundición de metales suaves. Como calentadores aislados flexibles, éstos se utilizan también para el calentamiento de tuberías en diversas industrias. Los hornos y estufas eléctricas se utilizan en una amplia gama de procesos que van desde el recocido, endurecimiento y forjado de metales hasta el secado de materiales con aire caliente. Las estufas se definen generalmente con este nombre cuando trabajan a temperaturas de hasta 723K (842°F); los hornos operan, por lo general, a temperaturas superiores a este valor. El modo dominante de transferencia de calor en estufas y hornos es la radiación, aunque la convección y conducción desde el aire

calentado por estos elementos, también lo hace en gran medida, dependiendo del tipo de horno. Actualmente hay muchos métodos para la construcción de hornos, los más comunes son los hornos de caja con elementos de calentamiento en la cavidad del horno, los de convección forzada con calentadores externos a la cavidad, los de retorta caliente, con los elementos de calentamiento y ventilación sellados desde el exterior, los de baja capacidad térmica que utilizan aislamiento de fibra en vez de refractarios de cerámica, los de retorta fría con reflectores de calor que protegen las paredes de calor y los de mufla con el calentador externo al tubo refractario. El aislamiento de los hornos consiste principalmente en óxidos de aluminio, silicio, magnesio y circonio, los hornos para tratamiento térmico suelen utilizar ladrillos de silicato de aluminio de alto grado para su protección.

El calentamiento infrarrojo (IR) o calentamiento radiante, tiene muchas ventajas, ya que el material que se está trabajando no necesita estar en contacto con los elementos de calentamiento o con el aire circulante. Aunque la generación de calor y liberación hacia el material es más eficiente que en otros métodos que emplean hornos y estufas, el calentamiento infrarrojo tiene una menor eficiencia global ya que la parte de energía útil depende de la capacidad de absorción del material que se calienta. La radiación se controla con reflectores, que también contribuyen a la eficiencia, la distribución de intensidad de una fuente de IR varía con la temperatura y se difunde más energía con longitudes de ondas más cortas cuando se incrementa la temperatura.

Las ventajas del calentamiento IR son las siguientes:

- a) Puede calentar sólo partes de un proceso o producto.
- b) Se requiere menor espacio que con otro tipo de estufas o calentadores.
- c) La producción puede incrementarse fácilmente añadiendo otras unidades de calor a las unidades ya disponibles, con objeto de tener más áreas locales de calentamiento o un calentamiento total incrementado.
- d) Los sistemas de agotamiento de flujo alto pueden reemplazarse con sistemas de flujo menor, ya que el aire no se calienta excesivamente.
- e) Son prácticas para este sistema, las temperaturas de productos hasta 923K.

Existen tres tipos principales de calentadores IR: los de haz amplio con un reflector a 100° de inclinación y una baja densidad de energía; los de haz múltiple, con un reflector de varios ángulos para establecer las densidades y cobertura de energía deseadas; y los destinados al trabajo pesado, que tienen energías hasta de 20 o 30 kW, donde el ancho de banda del haz es mediano, con inclinación de 60°, y se seleccionan para trabajos mecánicos muy rudos. Los elementos de calentamiento disponibles para este tipo de calentadores son de tres tipos:

- a) Lámparas de cuarzo, que son las que proporcionan la radiación más eficiente y utilizan elementos de tungsteno.
- b) Tubos de cuarzo con elementos de níquel-cromo, utilizados para calentadores de haz amplio y diversos niveles de energía.
- c) Varilla metálica, que consiste en un elemento de níquel-cromo rodeado por un aislante de óxido de magnesio con una cubierta metálica exterior; se utilizan para calentadores de un trabajo pesado.

### **2.3 Calentamiento por inducción.**

El calentamiento por inducción proporciona un medio para el calentamiento preciso de objetos que conducen electricidad, es limpio, rápido, repetible y se presta al ciclaje automático. No se requiere ningún contacto entre la carga de trabajo y la fuente de calor y el calor se puede limitar a áreas localizadas o a una región superficial de la carga. El calentamiento por inducción se produce cuando se sumergen materiales conductores eléctricos, como piezas de trabajo metálicas, en un campo magnético alterno, este campo se suele producir mediante una bobina eléctrica activada por una fuente adecuada de energía eléctrica de corriente alterna. El campo magnético por corriente alterna induce voltajes en el material conductor que producen corrientes circulantes, la magnitud de las corrientes inducidas se determina por la magnitud eficaz del voltaje inducido y la impedancia de la pieza de trabajo, el flujo de la corriente inducida genera pérdidas de  $I^2R$  y calor en la pieza de trabajo. Se produce calor adicional en piezas magnéticas, debido a las pérdidas por histéresis; este calor es por lo común pequeño, pero en algunos casos en que se incluyen campos magnéticos poderosos, el calor resultante puede llegar a ser

importante. El calentamiento por inducción es eficiente y práctico si se satisfacen ciertas relaciones básicas que incluyen la frecuencia del campo magnético y las propiedades de la pieza de trabajo, aunque las relaciones no son muy críticas, se deben satisfacer hasta donde se produzca una cantidad adecuada de efecto superficial en la pieza de trabajo. El efecto superficial es un fenómeno por el que las corrientes que fluyen en la pieza tienden a ser más intensas en la superficie, mientras que las corrientes en el centro se aproximan a cero. Como consecuencia de esta distribución, las corrientes producen un índice mayor de calentamiento cerca de la superficie, el efecto superficial se encuentra presente en todas las aplicaciones adecuadas de calentamiento por inducción.

Para lograr un calentamiento por inducción eficiente, tiene que haber una relación apropiada entre el diámetro de la pieza de trabajo (o el espesor) y la profundidad de referencia. Para un diámetro dado de la pieza, cuanto más delgadas sean las capas portadoras de corriente, tanto mayor será el índice de generación de calor en la superficie, cuando los demás factores permanezcan constantes. Si se pasan por alto los efectos menores, la profundidad eficaz de la capa portadora de corriente depende de la frecuencia de la corriente alterna generadora del campo magnético, la resistencia eléctrica y la permeabilidad magnética de la pieza. La frecuencia es el único de esos factores que se puede manipular con facilidad.

El índice de generación de calor mediante el calentamiento por inducción es proporcional a los ampere-vueltas de la bobina elevados al cuadrado, la resistividad eléctrica de la pieza de trabajo rige el índice de generación de calor en ella mediante  $I^2R$ . En una carga magnética se desarrollan también pérdidas por histéresis que son despreciables en comparación con las pérdidas por  $I^2R$ , a menos que se encuentren presentes campos excepcionalmente fuertes. Al calentar una carga no magnética de baja resistividad, se deben utilizar corrientes elevadas en la bobina de trabajo para lograr índices elevados de calentamiento. Por consiguiente, las pérdidas en la bobina tienden a ser altas y la eficiencia baja, cuando se calienta una pieza de trabajo de baja resistividad. En comparación con el calentamiento por resistor, el factor de potencia de la calefacción por inducción es relativamente bajo a 60 Hz, debido a los efectos de reactancia, esto tiende a disminuir al factor global de potencia de la

planta, que puede provocar castigos de energía aplicados por la compañía de servicio de utilidad pública. Normalmente se utilizan capacitores de corrección del factor de potencia.

### Aplicaciones más comunes del calentamiento por inducción.

Aplicación	Intervalo aproximado de frecuencia
Fundición	60 - 10 kHz
Endurecimiento superficial	10 kHz - 10 MHz
Soldado	10 kHz - 10 MHz
Forjado	60 - 3 kHz
Soldado de tubos	10 - 500 kHz
Templado	60 - 10 kHz
Calentamiento local	10 - 500 kHz
Refinación en zona de semiconductores	50 - 500 kHz

#### 2.4 Calentamiento dieléctrico.

El calentamiento dieléctrico es el término que se aplica a la generación de calor en materiales no conductores debido a sus pérdidas cuando se someten a un campo eléctrico alterno de frecuencia elevada. Las frecuencias necesarias van de 1 a 200 MHz, el calentamiento de los conductores por este método es extremadamente rápido, esta forma de calentamiento se aplica poniendo una carga no conductora entre dos electrodos, a través de los cuales se aplica un voltaje de alta frecuencia. Esta disposición constituye un capacitor eléctrico, en el que la carga actúa como dieléctrico, aunque idealmente un capacitor no tiene pérdidas, se producen pérdidas prácticas y se genera calor suficiente a frecuencias elevadas para que resulte una forma práctica de fuente de calor. La frecuencia utilizada en el calentamiento dieléctrico es función de la potencia deseada y el tamaño del material de trabajo. Los valores prácticos de voltajes que se aplican a los electrodos son de 2000 a 5000 Volts/pulg. de espesor del material de trabajo, la fuente de potencia es exclusivamente por osciladores electrónicos capaces de generar las frecuencias muy

altas que convienen. Algunos de los usos más comunes con calentamiento dieléctrico son: desecación de madera, curado y encolado, precalentamiento de materiales plásticos, elaboración del caucho y materiales sintéticos, procesamiento de artículos alimenticios y desecación y tratamiento térmico de artículos textiles. El requisito básico para el calentamiento dieléctrico es el establecimiento de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia dentro del material o de la carga que se va a calentar, una vez establecido el campo eléctrico, el segundo requisito incluye las propiedades de pérdida dieléctrica del material que se va a calentar, la pérdida dieléctrica de un material determinado se produce debido a los efectos de polarización eléctrica en el material mismo. Hay cuando menos cuatro tipos reconocidos de esa polarización: dos que se producen debido al campo mismo o polarización inducida y dos que son inherentes y determinados por la disposición de las partículas componentes del material propiamente dicho. Estos mecanismos de pérdidas son: 1) polarización electrónica, 2) polarización atómica, 3) orientación dipolar y 4) polarización de carga espacial. Las dos últimas son las más importantes en el calentamiento dieléctrico.

### Comparación de los métodos de calentamiento eléctrico.

	Calentamiento por resistencia		Calentamiento por inducción	Calentamiento dieléctrico
	Directo	Indirecto		
<b>Ventajas</b>				
Limpieza: sin contaminantes	X	X	X	X
Fácil y exactamente controlable	X	X	X	X
Eficiente: poco calor a los alrededores	X		X	X
Baja inversión de capital	X	X	X	X
Bajo mantenimiento	X	X	X	X
Electricidad disponible con facilidad	X	X	X	X
Imposible ejecutar su tarea con combustible fósil	X		X	X
Electricidad generada por carbón o reacción nuclear	X	X	X	X
Calentamiento eléctrico en no conductores				X
Calor generado internamente	X		X	X
Posibilidad de alta eficiencia eléctrica	X		X	
No hay contacto directo			X	X
<b>Desventajas</b>				
Alto costo de energía	X	X	X	X
Ocasionalmente, es difícil la uniformidad en el calentamiento	X		X	X
Sólo se tiene energía limitada disponible en ciertas ocasiones	X	X	X	X
La conversión a partir de combustibles fósiles es baja	X	X	X	X
Alto costo de conversión del equipo actual	X	X	X	X

## 2.5 Resistencia Térmica y la Analogía Eléctrica.

### La pared plana.

Retomando la ley de Fourier de conducción del calor

$$Q_t = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.11)$$

Esta ecuación (2.11), la podemos reorganizar y expresarla de la siguiente forma

$$Q_t = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{kA}} \quad (2.12)$$

La ley de Ohm para la conducción eléctrica se expresa de la siguiente manera,

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (2.13)$$

donde :  $I$  = Corriente eléctrica, (A)

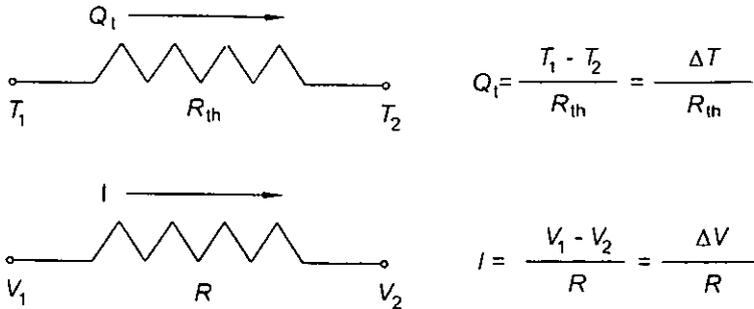
$R$  = Resistencia eléctrica, ( $\Omega$ )

$\Delta V$  = Diferencia de voltaje, (V)

Podemos ver que existe una analogía matemática directa entre la conducción del calor (ley de Fourier) y la conducción de la electricidad (ley de Ohm). La resistencia análoga en la ley de Fourier es llamada resistencia térmica,  $R_{th}$ , y está definida por

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (2.14)$$

Las unidades para  $R_{th}$  en los sistemas Internacional e Inglés son  $K/W$  ( $^{\circ}C/W$ ) y  $^{\circ}R \cdot h/Btu$  ( $^{\circ}F \cdot h/Btu$ ), respectivamente. La resistencia térmica puede ser vista como un resistor en el mismo sentido que se le da en la terminología eléctrica, la figura 2.1 muestra dos resistores, el primero es un resistor térmico por donde fluye el calor, y el segundo es un resistor eléctrico, a través del cual fluye la corriente eléctrica. La diferencia de potencial a través del resistor térmico es una diferencia de temperatura, mientras que la diferencia de potencial a través del resistor eléctrico es una diferencia de voltaje. En ambas situaciones, la diferencia de potencial es la que conduce el flujo de corriente o calor, por lo cual, si no hay una diferencia de voltaje, la corriente no fluye, y de la misma forma, si no existe una diferencia de temperatura, el calor no fluye.



**Fig. 2.1** Hay una analogía entre el calor de conducción y la conducción eléctrica.

### Resistores en serie.

Cuando dos o más resistencias están conectadas en serie en un circuito eléctrico (ver fig. 2.2), la resistencia total se puede calcular utilizando la segunda ley de Kirchoff sobre voltajes, la cual especifica que "la suma de los voltajes en un circuito cerrado es igual a cero".

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 0 \quad (2.15)$$

Despejando el voltaje  $V$  de la ley de Ohm (ecuación 2.13),

$$V = IR \quad (2.16)$$

Sustituyendo la ecuación (2.16) en los términos de la ecuación (2.15), obtenemos

$$IR_t = I_1R_1 + I_2R_2 + I_3R_3 = 0 \quad (2.17)$$

Como la corriente  $I$  que circula en el circuito mostrado en la figura 2.2, es la misma que pasa por cada una de las resistencias, entonces

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (2.18)$$

Sustituyendo la ecuación (2.18) en la ecuación (2.17) y factorizando  $I$ ,

$$IR_t = I(R_1 + R_2 + R_3) \quad (2.19)$$

Por lo tanto, la resistencia total o equivalente del circuito es

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.20)$$

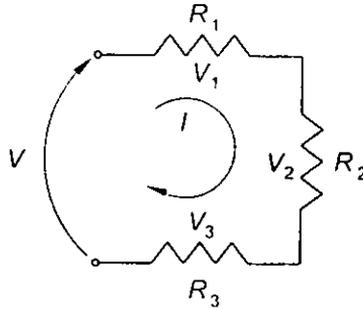


Fig. 2.2 Resistencias eléctricas en serie.

Para el caso general, en el que exista un número  $N$  de resistencias en serie en el circuito eléctrico, la ecuación (2.20) se transforma en

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N = \sum R_i \quad (2.21)$$

De manera similar, cuando dos o más materiales están unidos formando un cuerpo compuesto (fig. 2.3), la resistencia térmica total es la suma de las resistencias. Por lo tanto, la resistencia térmica total para la pared compuesta mostrada en la figura 2.3 está definida por

$$R_{th, total} = R_{th,1} + R_{th,2} + R_{th,3} \quad (2.22)$$

El gradiente de temperatura es diferente en cada bloque debido a que presentan un espesor y una conductividad térmica diferentes. El área de la superficie  $A$ , sobre la cual ocurre la conducción, se asume como la misma para cada bloque en un circuito térmico en serie en una dimensión, variando solo la conductividad térmica y el espesor. También se asume que cada bloque en el cuerpo compuesto está en contacto térmico íntimo con sus vecinos, de manera que no existe una resistencia de contacto en las interfases. La situación ilustrada en la figura 2.3 se puede extender a cualquier número de bloques en el cuerpo compuesto. Para este caso general en el que existe un número  $N$  de bloques en serie en la pared compuesta, la resistencia térmica total es

$$R_{th, total} = R_{th,1} + R_{th,2} + R_{th,3} + \dots + R_{th,N} = \sum R_{th,i} \quad (2.23)$$

El flujo de calor en la pared compuesta (fig. 2.3) es constante y en una sola dimensión, por lo cual concluimos que la transferencia de calor en cada bloque es la misma. Esto es análogo al principio de continuidad en mecánica de fluidos. Para un flujo constante de un fluido en una red de tuberías en serie de diferentes tamaños, el flujo másico debe ser el mismo en cada tubería para satisfacer la ley de la conservación de la masa, similarmente, para un flujo constante de calor en una red de diferentes bloques en serie, el flujo de calor debe ser el mismo en cada bloque para satisfacer la ley de la conservación de la energía. De aquí, que podamos escribir

$$Q_t = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1} = \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_2} = \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_3} \quad (2.24)$$

$$k_1 A \quad k_2 A \quad k_3 A$$

Alternativamente, la ecuación (2.24) se puede escribir en términos del flux de calor, porque el área de la superficie  $A$ , es la misma para cada bloque.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1} = \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_2} = \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_3} \quad (2.25)$$

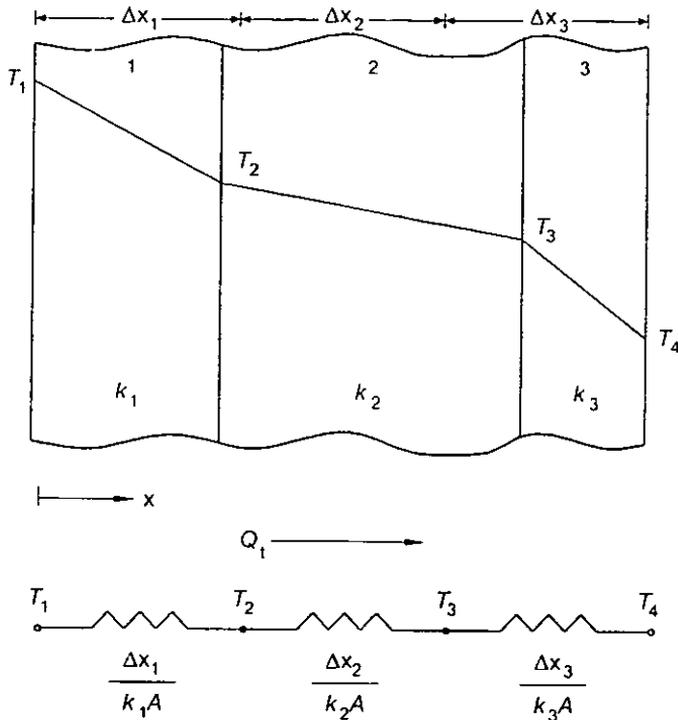
$$k_1 \quad k_2 \quad k_3$$

Cuando las tres ecuaciones independientes de la ecuación (2.24) se escriben en términos de sus respectivas diferencias de temperatura y las juntamos, obtenemos la siguiente relación para la transferencia de calor a través de la pared compuesta en términos de la diferencia de temperatura total ( $T_1 - T_4$ ).

$$Q_t = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A} + \frac{\Delta x_2}{k_2 A} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A}} \quad (2.26)$$

Para el caso general, en el que existe un número  $N$  de bloques en la pared compuesta

$$Q_t = \frac{\Delta T_{total}}{\sum R_{thi}} \quad (2.27)$$



**Fig. 2.3** Los resistores eléctricos en serie pueden ser usados para representar la conducción constante en una sola dimensión en una pared compuesta.

### Resistores en paralelo.

Cuando dos o más resistencias están conectadas en paralelo en un circuito eléctrico (ver fig. 2.4), la resistencia total se puede calcular utilizando la primera ley de Kirchhoff de las corrientes, la cual nos dice que "la suma de las corrientes que llegan a un nodo es igual a cero". De acuerdo con esta definición, para el nodo (a) de la figura 2.4, tenemos

$$I = I_1 + I_2 = 0 \quad (2.28)$$

Utilizando la ec. (2.13) para sustituirla en los términos de la ec. (2.28), obtenemos

$$V = V_1 = V_2 = 0 \quad (2.29)$$

Como el voltaje  $V$  aplicado al circuito mostrado en la figura 2.4 es constante,

$$V = V_1 = V_2 \quad (2.30)$$

Sustituyendo la ecuación (2.30) en la ecuación (2.29) y factorizando  $V$ ,

$$\frac{V}{R_t} = V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.31)$$

De esta ecuación (2.31), podemos ver que el inverso de la resistencia total o equivalente del circuito es

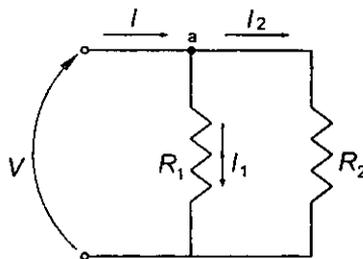
$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.32)$$

Para el caso general, en el que exista un número  $N$  de resistencias en paralelo en el circuito eléctrico, la ecuación (2.32) se transforma en

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (2.33)$$

Las resistencias térmicas en paralelo se obtienen de manera similar. Así, para un circuito térmico que consiste de  $N$  resistores en paralelo, la resistencia total es,

$$R_{th, total} = \frac{1}{\frac{1}{R_{th,1}} + \frac{1}{R_{th,2}} + \frac{1}{R_{th,3}} + \dots + \frac{1}{R_{th,N}}} \quad (2.34)$$



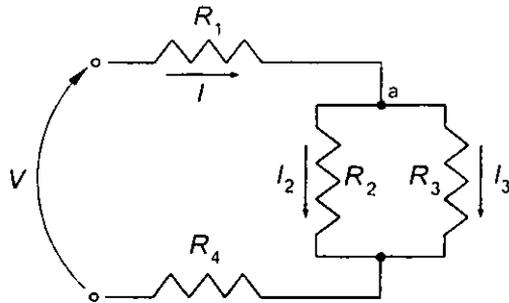
**Fig. 2.4** Resistencias eléctricas en paralelo.

### Resistores combinados (serie-paralelo).

Combinando los métodos de cálculo de los circuitos en serie y paralelo ya vistos, tenemos que para la figura 2.5, la resistencia total del circuito se obtiene con la ecuación (2.35), y para la figura 2.6 con la ecuación (2.36).

$$R_{total} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} + R_4 \quad (2.35)$$

Fig. 2.5 Resistores eléctricos en serie-paralelo.



$$R_{th.total} = R_{th,1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{th,2}} + \frac{1}{R_{th,3}}} + R_{th,4} \quad (2.36)$$

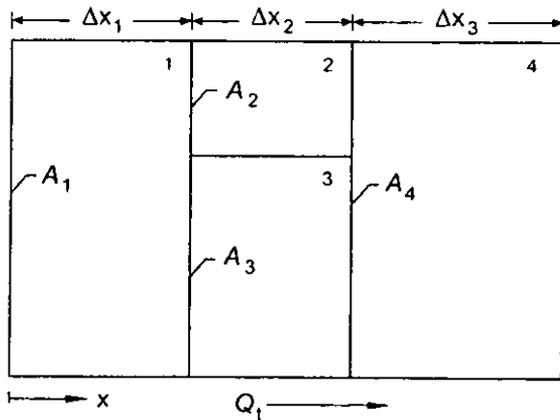


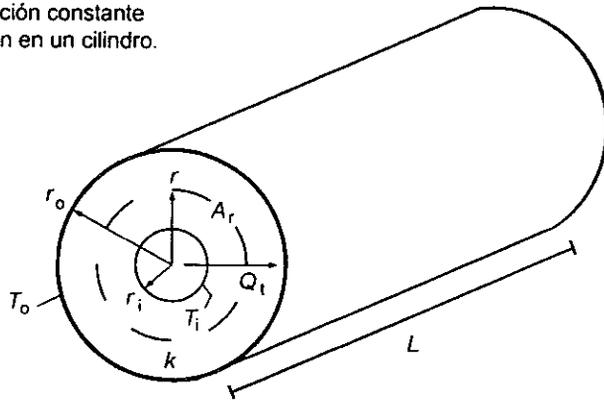
Fig. 2.6 Resistores térmicos en serie-paralelo.

### El cilindro.

La analogía eléctrica también puede ser aplicada a geometrías cilíndricas, como el cilindro hueco que se muestra en la figura 2.7, el cual tiene un radio interno  $r_i$  y un radio externo  $r_o$ . Si se mantiene una diferencia de temperatura constante a través de la pared del cilindro, el calor puede ser conducido constantemente y radialmente de  $r_i$  a  $r_o$  si la temperatura de la superficie interna es más alta que la de la superficie externa. La ley de Fourier para la conducción del calor en la dirección radial es

$$Q_t = kA_r \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (2.37)$$

Fig. 2.7 Conducción constante en una dimensión en un cilindro.



Desafortunadamente, los cilindros huecos no tienen un área constante transversal sobre la cual fluye el calor, ya que dicha área se incrementa cuando el radio disminuye. La cantidad  $A_r$  utilizada en la ecuación (2.37) indica que el área varía con el radio, ésta área  $A_r$ , está dada por la relación

$$A_r = 2\pi rL \quad (2.38)$$

donde  $r$  es la coordenada radial y  $L$  es la longitud del cilindro. Si sustituimos esta ecuación (2.38) en la ecuación (2.37), obtenemos

$$Q_t = 2\pi kLr \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (2.39)$$

Para expresar esta ecuación de manera que sea análoga a la ley de Ohm, el gradiente de temperatura se escribe como una derivada, quedando

$$Q_t = -2\pi kLr \frac{dT}{dr} \quad (2.40)$$

donde el signo menos es reintroducido para asegurar que la transferencia de calor es en la dirección del decremento de temperatura. La dirección del flujo de calor en el cilindro hueco es de  $r_i$  a  $r_o$ , y las temperaturas en las superficies interna y externa del cilindro son  $T_i$  y  $T_o$  respectivamente. Rearreglando la ecuación (2.40) e integrando, obtenemos

$$2\pi kL \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = - \int_{T_i}^{T_o} dT \quad (2.41)$$

Resolviendo

$$Q_t = \frac{(T_i - T_o)}{\ln(r_o / r_i)} \cdot 2\pi kL \quad (2.42)$$

Esta última ecuación tiene la forma de la ley de Ohm, donde la diferencia de temperatura a través de la pared del cilindro es  $(T_i - T_o)$ , y la resistencia térmica de la pared es

$$R_{th} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL} \quad (2.43)$$

En el cilindro compuesto de la figura 2.8, cada bloque tiene una resistencia térmica que puede ser calculada con la ecuación (2.43). Si asumimos que no existe resistencia de contacto en las interfases, la resistencia térmica total del cilindro compuesto se puede obtener sumando las resistencias de los bloques de acuerdo con la ecuación (2.23). Debido a que la transferencia de calor en el cilindro compuesto es constante, la transferencia de calor en cada bloque es la misma, por lo tanto, podemos escribir

$$Q_t = \frac{2\pi k_1 L (T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)} = \frac{2\pi k_2 L (T_2 - T_3)}{\ln(r_3 / r_2)} = \frac{2\pi k_3 L (T_3 - T_4)}{\ln(r_4 / r_3)} \quad (2.44)$$

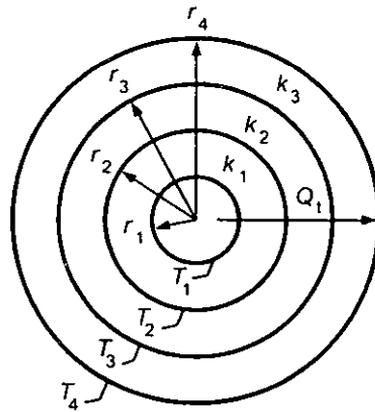
Alternativamente, ésta ecuación se puede escribir en términos de la transferencia de calor por unidad de longitud del cilindro si la dividimos entre la longitud  $L$ .

$$\frac{Q_l}{L} = \frac{2\pi k_1(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi k_2(T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} = \frac{2\pi k_3(T_3 - T_4)}{\ln(r_4/r_3)} \quad (2.45)$$

Si las ecuaciones independientes de la ecuación (2.44) se escriben en términos de sus respectivas diferencias de temperatura y se suman, obtenemos la siguiente relación para la transferencia de calor a través del cilindro compuesto en términos de la diferencia de temperatura total,  $(T_1 - T_4)$ .

$$Q_l = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_3}} \quad (2.46)$$

**Fig. 2.8** Conducción constante en una dimensión en un cilindro compuesto.



## 2.6 Coeficiente de transferencia de calor total.

### La pared plana.

La figura 2.9 nos muestra una pared compuesta plana expuesta a un fluido caliente por uno de sus lados, y a un fluido frío por el otro lado. El calor es transferido de izquierda a derecha atravesando una primera frontera térmica, dos bloques de material sólido y una segunda frontera térmica. El circuito eléctrico análogo consiste de cuatro resistores, dos para los bloques sólidos y dos para las fronteras térmicas de los bloques. Como se mencionó anteriormente, la transferencia de calor por convección puede ser expresada como la ley de enfriamiento de Newton,

$$Q_t = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.47)$$

Con un simple rearrreglo, la ecuación (2.47) queda expresada como

$$Q_t = \frac{(T_w - T_\infty)}{\frac{1}{hA}} \quad (2.48)$$

la cual, al igual que la ley de Fourier, tiene una forma análoga a la ley de Ohm. La diferencia de temperatura ( $T_w - T_\infty$ ) es análoga a la diferencia de voltaje, y el término  $1/hA$  es análogo a la resistencia. Por lo tanto, la resistencia térmica para la frontera térmica de un bloque está dada por

$$R_{th} = \frac{1}{hA} \quad (2.49)$$

Ahora tenemos un circuito térmico equivalente que consiste de dos resistores de conducción conectados en serie con dos resistores por convección. La transferencia de calor que atraviesa la pared compuesta plana, incluyendo las fronteras térmicas de los bloques, puede ser escrita en términos de la diferencia de temperatura total y de la resistencia térmica total, de la siguiente manera

$$Q_t = \frac{(T_1 - T_5)}{\frac{1}{h_1A} + \frac{\Delta x_1}{k_1A} + \frac{\Delta x_2}{k_2A} + \frac{1}{h_2A}} \quad (2.50)$$

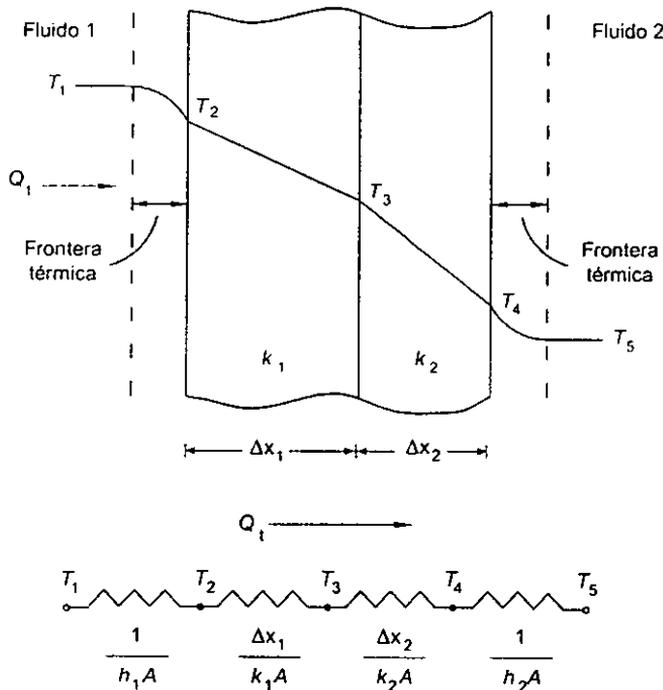


Fig. 2.9 Los resistores eléctricos en serie pueden ser utilizados para representar la conducción y convección constantes en una sola dimensión en paredes compuestas.

Esta relación se puede extender a un número  $N$  de bloques sólidos agregando mas resistencias por conducción en el denominador. Así que, la ecuación general para la transferencia de calor constante en una dimensión a través de una pared compuesta plana con fluidos en ambos lados es

$$Q_t = \frac{\Delta T_{total}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{A} \sum \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (2.51)$$

como el área,  $A$ , aparece en cada término del denominador, entonces

$$Q_t = UA \Delta T_{total} \quad (2.52)$$

donde

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.53)$$

La variable  $U$  es llamada coeficiente de transferencia de calor total, o valor  $U$ , y tiene unidades de  $W/m^2K$  en el Sistema Internacional, y  $Btu/h\text{pie}^2\text{R}$  en el Sistema Inglés.

### El cilindro.

Consideremos el cilindro compuesto hueco mostrado en la figura 2.10, que contiene un fluido a la temperatura  $T_i$  fluyendo por su interior, dándonos un coeficiente de transferencia de calor  $h_i$ . Y un segundo fluido a la temperatura  $T_o$  que fluye por su parte exterior, dándonos un coeficiente de transferencia de calor  $h_o$ . El fluido que va por el interior está más caliente que el fluido que circula por el exterior, por lo que el calor es transferido radialmente de adentro hacia afuera del cilindro. El circuito eléctrico equivalente mostrado en la misma figura, contiene dos resistencias para los bloques sólidos y dos para las fronteras térmicas de los bloques. La transferencia de calor para esta situación está dada por la relación

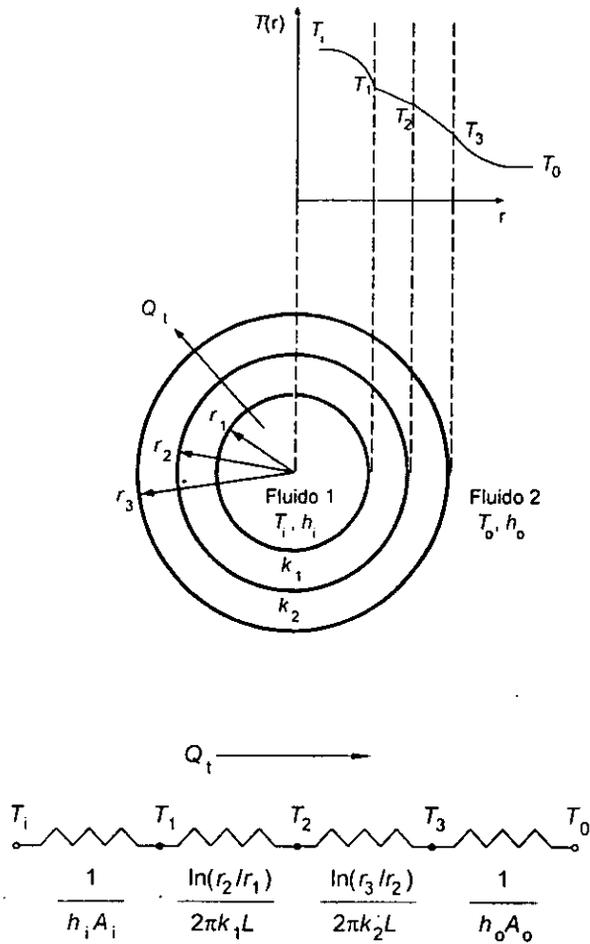
$$Q_t = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad (2.54)$$

donde  $A_i$  y  $A_o$  son las áreas superficiales interna y externa del cilindro, respectivamente. Para los cilindros el coeficiente de transferencia de calor total puede ser basado en cualquiera de las áreas superficiales ya mencionadas, de aquí que podamos escribir

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{A_i \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{A_i}{A_o h_o}} \quad (2.55)$$

para el valor de  $U$  basado en el área superficial interna. Si usamos la ecuación (2.55) para el valor de  $U$ , debemos usar la siguiente relación para la transferencia de calor

$$Q_t = U_i A_i \Delta T_{total} \quad (2.56)$$



**Fig. 2.10** Los resistores eléctricos en serie pueden ser utilizados para representar la conducción y convección constantes en una sola dimensión en cilindros compuestos.

El valor de  $U$  basado en el área superficial externa es

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.57)$$

Si utilizamos la ecuación (2.57) para el valor de  $U$ , debemos usar la relación

$$Q_t = U_o A_o \Delta T_{total} \quad (2.58)$$

para la transferencia de calor. Las relaciones del valor de  $U$  para cilindros pueden extenderse a un número de  $N$  bloques, si agregamos más resistencias por conducción en el denominador de las ecuaciones (2.55) y (2.57). Por consiguiente, tenemos

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{2\pi L} \sum \frac{\ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}} \quad (2.59)$$

y

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o}{2\pi L} \sum \frac{\ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (2.60)$$

## 2.7 Generación de calor interna.

Cuando la corriente fluye en un alambre, la resistencia del alambre causa una caída de voltaje a lo largo del alambre, resultando en una pérdida de energía eléctrica. Esta energía eléctrica perdida es convertida en energía térmica, llamada calentamiento de Joule, o calentamiento  $I^2R$ , que es manifestado como la transferencia de calor del alambre. Como las pérdidas de potencia eléctrica son iguales a la transferencia de calor, podemos escribir

$$P = I^2R = Q_t \quad (2.61)$$

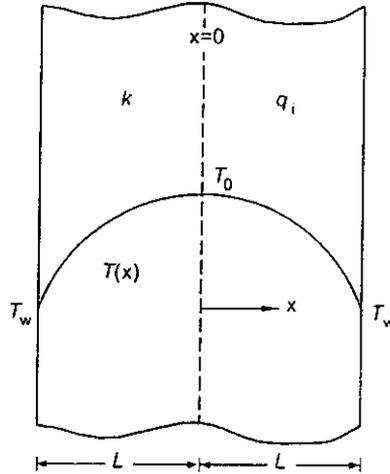
donde  $P$  = Potencia (W),  $I$  = Corriente (A), y  $R$  = Resistencia ( $\Omega$ ). Una longitud dada de alambre tiene las mismas pérdidas de calor, ya sea que esté aislado o no, porque la transferencia de calor está solamente en función de la corriente y de la resistencia, pero la temperatura del alambre es una función de cómo es aislado dicho alambre.

Los alambres normalmente son revestidos o recubiertos con aislantes, cuya función principal es la de prevenir un corto eléctrico, pero los buenos aislantes eléctricos son generalmente buenos aislantes térmicos. De aquí, que la temperatura del alambre, pueda ser controlada y minimizada aislando el alambre con el radio crítico de aislante, sin embargo, existe un caso especial de la conducción constante en una dimensión, que incluye sistemas en los cuales la energía térmica es generada internamente, como por ejemplo, el calentamiento de conductores eléctricos. En esta situación la energía térmica es generada dentro del material, es decir, la energía térmica es generada volumétricamente, porque la energía se origina de cada punto interno del material. En este análisis, asumiremos que la energía es generada uniformemente a través del material en cuestión, además, consideraremos la conducción constante en una dimensión debido a la generación de calor interna en paredes planas y cilindros sólidos.

### **La pared plana.**

Considerar la pared plana ilustrada en la figura 2.11. La pared tiene una conductividad térmica  $k$ , y una generación de calor volumétrico,  $q_i$ . Si asumimos que la transferencia de calor ocurre solamente en la dirección "x", podemos ignorar las dimensiones de la pared en las direcciones "y" y "z". Las unidades para  $q_i$  en el Sistema Internacional son  $W/m^3$ , y en el Sistema Inglés  $Btu/hft^3$ . Por conveniencia matemática, permitimos que el espesor de la pared sea  $2L$  y localizamos el origen en el centro de la pared. Como ya hemos visto, la energía térmica puede ser conducida en el espacio de tres dimensiones, por lo que en el sistema de coordenadas rectangulares, esto significa que la transferencia de calor tiene tres componentes independientes, cada uno correspondiente a las tres coordenadas espaciales,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Además, si la conducción no es constante, la temperatura se vuelve una función del tiempo también, y si la energía térmica es generada internamente, este efecto debe ser considerado. Así que, en el caso general, la temperatura es una función de las tres coordenadas espaciales,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , del tiempo,  $t$ , y de la generación de calor interna,  $q_i$ . Todos estos factores son tomados en cuenta para la ecuación diferencial general para la conducción del calor:

**Fig. 2.11** La generación interna de calor en una pared plana produce una distribución de temperatura parabólica.



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.62)$$

Esta ecuación puede ser derivada escribiendo la primera ley de la termodinámica para un elemento de volumen diferencial y empleando la ley de Fourier de conducción. Los primeros tres términos del lado izquierdo de la ecuación (2.62) describen el cambio de temperatura con respecto a las coordenadas espaciales. El cuarto término del lado izquierdo es el término de la generación de calor interna, y el término del lado derecho describe el cambio de la temperatura con el tiempo. El parámetro  $\alpha$  es llamado difusividad térmica y está definido por la relación  $\alpha = k / \rho C_p$ . Para la conducción constante en la dirección  $x$ , el segundo y el tercer término del lado izquierdo de la ecuación (2.62) son cero, porque no existe una dependencia de la temperatura en  $y$  o  $z$ . El término del lado derecho de la misma ecuación es también cero, porque la conducción es constante. Por consiguiente, nos quedamos con la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{q_i}{k} = 0 \quad (2.63)$$

Esta ecuación es la ecuación diferencial que gobierna la conducción constante en una dimensión en una pared plana con generación de calor interna.

La ecuación (2.63) se puede reescribir como

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{dT}{dx} \right) + \frac{q_i}{k} = 0 \quad (2.64)$$

restando el término  $q_i/k$  de ambos lados de la ecuación, multiplicando por  $dx$ , e integrando, obtenemos

$$\int d \left( \frac{dT}{dx} \right) = - \frac{q_i}{k} \int dx \quad (2.65)$$

resolviendo la ecuación (2.65)

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{q_i}{k} x + C_1 \quad (2.66)$$

donde  $C_1$  es la primera constante de integración. Multiplicando nuevamente por  $dx$  e integrando

$$\int dT = - \frac{q_i}{k} \int x dx + \int C_1 dx \quad (2.67)$$

lo que nos lleva a

$$T(x) = - \frac{q_i}{2k} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (2.68)$$

donde  $C_2$  es la segunda constante de integración. La ecuación (2.68) es la solución general de la ecuación (2.63). Para encontrar la solución particular de la ecuación (2.68), debemos encontrar las dos constantes de integración  $C_1$  y  $C_2$  utilizando las condiciones a la frontera para nuestro problema de la pared plana. Si las superficies de la pared se mantienen a la temperatura  $T_w$  como se muestra en la figura 2.11, forzamos al perfil de temperatura  $T(x)$  en la pared a ser simétrico alrededor de su línea central a  $x=0$ , y al gradiente de temperatura  $dT/dx$  a ser cero a  $x=0$ . Por lo tanto, nuestras dos condiciones a la frontera son

$$\text{C.F.1: } dT/dx = 0 \quad \text{a} \quad x = 0$$

$$\text{C.F.2: } T = T_w \quad \text{a} \quad x = \pm L$$

La línea del centro de una pared con un espesor  $2L$  no es una frontera actual, pero si consideramos la simetría térmica del problema, podemos remover esencialmente la mitad de la pared, en tal caso, la línea del centro se convierte en una frontera actual. Cuando se hace esto, la frontera a  $x=0$  es tratada como si estuviera perfectamente aislada, porque  $dT/dx=0$  y, de acuerdo con la ley de Fourier,  $Q_t = kA(dT/dx) = kA(0) = 0$ .

Sustituyendo la primera condición a la frontera en la ecuación (2.66), obtenemos

$$C_1 = 0$$

y sustituyendo la segunda condición a la frontera en la ecuación (2.68), obtenemos

$$C_2 = \frac{q_i L^2}{2k} + T_w$$

Sustituyendo estos resultados en la ecuación (2.68) y haciendo un rearrreglo algebraico, la distribución de temperatura en la pared es

$$T(x) - T_w = \frac{q_i L^2}{2k} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (2.69)$$

la cual es una función parabólica de  $x$ . Eso es usualmente deseable para encontrar la temperatura en el centro de la pared, porque la temperatura es un máximo en ese punto. Sustituyendo  $x=0$  en la ecuación (2.69) encontramos que la temperatura  $T_o$  en el centro de la pared es

$$T_o = \frac{q_i L^2}{2k} + T_w \quad (2.70)$$

Una relación alternativa para la distribución de temperatura puede ser obtenida sustituyendo la ecuación (2.70) en la ecuación (2.69), lo que nos da

$$\frac{T(x) - T_w}{T_o - T_w} = 1 - \left( \frac{x}{L} \right)^2 \quad (2.71)$$

### El cilindro.

Considerando la generación de calor interna en un cilindro sólido, como el mostrado en la figura 2.12, donde  $q_i$  es la generación de calor interna y  $k$  es la conductividad térmica. El radio del cilindro es  $R$ . La ecuación diferencial parcial que gobierna la conducción en un cilindro es

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.72)$$

Los dos primeros términos del lado izquierdo de la ecuación describen el cambio en la temperatura  $T$  con respecto a la coordenada radial,  $r$ , el tercer término describe el cambio en  $T$  con respecto a la coordenada azimutal,  $\phi$ , y el cuarto término describe el cambio en  $T$  con respecto a la coordenada axial,  $z$ . Los términos restantes son idénticos a los de la ecuación (2.62). En muchas aplicaciones de transferencia de calor que involucran la generación de calor interna en cilindros, la conducción ocurre primeramente en la dirección radial. Por lo tanto, restringiremos nuestro análisis solamente a la conducción constante en una dimensión en la dirección radial. De aquí, que la ecuación diferencial que gobernante se reduzca a

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q_i}{k} = 0 \quad (2.73)$$

Las condiciones a la frontera para este problema son las mismas que para la pared plana

$$\text{C.F.1: } dT/dr = 0 \quad \text{a } r = 0$$

$$\text{C.F.2: } T = T_w \quad \text{a } r = R$$

La ecuación (2.73) puede ser integrada dos veces para obtener la solución general

$$T(r) = -\frac{q_i}{4k} r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (2.74)$$

Utilizando las condiciones a la frontera, la solución particular es

$$T(r) - T_w = \frac{q_i R^2}{4k} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.75)$$

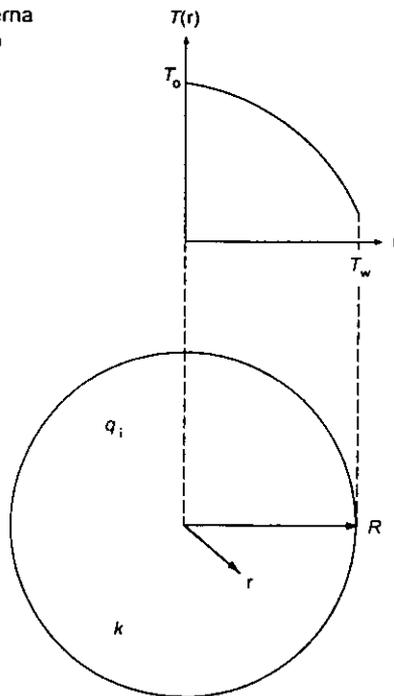
o, en forma adimensional,

$$\frac{T(r) - T_w}{T_o - T_w} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.76)$$

donde  $T_o$  es la temperatura en el centro del cilindro. La temperatura en el centro del cilindro está dada por la relación

$$T_o = \frac{q_i R^2}{4k} + T_w \quad (2.77)$$

**Fig. 2.12** La generación interna de calor en un cilindro sólido produce una distribución de temperatura parabólica.



En condiciones de estado constantes, todo el calor generado  $I^2R$  en el alambre es perdido a los alrededores por convección, por lo tanto, podemos igualar el calor perdido  $I^2R$  a la transferencia de calor por convección

$$Q_t = I^2R = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.78)$$

La ecuación (2.78), es la ecuación básica para el diseño de calentadores eléctricos, donde  $R$  ( $\Omega$ ), que es la resistencia de un conductor al flujo de corriente, puede ser determinada por la siguiente relación

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.79)$$

donde  $\rho$ , es la resistividad del conductor ( $\Omega\text{m}$ ),  $L$ , la longitud del conductor (m), y  $A = \pi R_o^2$ , el área transversal del conductor ( $\text{m}^2$ ). Además, esta resistencia  $R$  ( $\Omega$ ), se incrementa con el aumento de la temperatura  $T$  (K), de la siguiente manera

$$R_2 = R_1 + R_1\beta(T_2 - T_1) \quad (2.80)$$

donde  $R_1$ , es la resistencia del conductor a la temperatura  $T_1$ ,  $R_2$ , es la resistencia del conductor a la temperatura  $T_2$ , y  $\beta$ , es un coeficiente de temperatura. Si dividimos la ecuación (2.78), entre el área de la superficie del conductor, obtenemos el flujo térmico o flux de calor,

$$q_w = h(T_w - T_\infty) \quad (2.81)$$

debido a que la temperatura máxima,  $T_o$ , ocurre en el centro del conductor, podemos despejar el término  $T_w$  de la ecuación (2.77), y sustituirlo en la ecuación (2.78), quedándonos

$$I^2R = hA \left( T_o - T_\infty - \frac{q_i R_o^2}{4k} \right) \quad (2.82)$$

la generación de calor volumétrica,  $q_i$ , es la transferencia de calor dividida entre el volumen,  $V$ , de una longitud unitaria del conductor. Por lo tanto,

$$q_i = \frac{Q_t}{V} = \frac{I^2R}{\pi R_o^2 L} \quad (2.83)$$

sustituyendo este resultado en la última expresión y sabiendo que el área superficial del alambre es  $A = 2\pi R_o L$ , obtenemos

$$I^2 R = 2\pi R_o L h \left( T_o - T_\infty - \frac{I^2 R}{4\pi k L} \right) \quad (2.84)$$

resolviendo para  $I^2 R$

$$I^2 R = \frac{2\pi R_o L h (T_o - T_\infty)}{\left( 1 + \frac{R_o h}{2k} \right)} \quad (2.85)$$

sustituyendo la ecuación (2.79) en la ecuación (2.85), y despejando la diferencia de temperatura ( $T_o - T_w$ ),

$$(T_o - T_\infty) = \frac{I^2 \rho \left( 1 + \frac{R_o h}{2k} \right)}{2\pi^2 R_o^3 h} \quad (2.86)$$

para cilindros pequeños con una alta conductividad térmica, tales como los alambres, la ecuación (2.86) se puede reducir a

$$(T_w - T_\infty) = \frac{I^2 \rho}{2\pi^2 R_o^3 h} \quad (2.87)$$

la eliminación del término de la generación de calor volumétrica, es debido a que el gradiente de temperatura radial en el alambre es despreciable, lo que significa que la temperatura en el centro del alambre es prácticamente la misma que la temperatura de la pared. Sin embargo, para cilindros grandes o cilindros con baja conductividad térmica, existe un gradiente de temperatura radial significativo, por lo que la generación de calor interna debe ser determinada.

## **CAPITULO III**

### **TIPOS DE CALENTADORES**

### **DE PROCESO**

En este capítulo se presentarán los diferentes tipos de cambiadores de calor, equipos de fusión y desecación de sólidos existentes en el mercado. Se ha intentado cubrir el mayor número posible de equipos, a fin de obtener un panorama amplio de las alternativas posibles. Debido a la cantidad tan grande de equipos que se utilizan en la industria para calentar líquidos o gases, y secar o fundir sólidos, se realizará una clasificación de acuerdo a las características de construcción que presentan dichos equipos, este es con el fin de dar una secuencia lógica a la descripción de cada uno de ellos.

### 3.1 Cambiadores de un sólo tubo.

Este es el equipo de transferencia de calor más sencillo. Su aplicación se encuentra limitada al intercambio de calor sensible, para calentar o enfriar un fluido de proceso, cuando se requieren áreas de transferencia pequeñas.

**Serpentines.** Se usan para el calentamiento o enfriamiento de fluidos dentro de recipientes de almacenamiento o reactores. Pueden tener un número infinito de configuraciones, lo cual depende de la aplicación.

- a) Serpentine de tubo con aletas.
- b) Serpentine de placas o tableros.
- c) Serpentine de vidrio.
- d) Serpentine de inmersión de teflón.
- e) Serpentine externos y rastreadores.

**Bayoneta.** Este cambiador consiste de pares de tubos concéntricos con el tubo exterior sellado en uno de sus extremos. El fluido entra a la unidad por el tubo interno y retorna por el anulo; tanto el tubo exterior como el interior se sujetan a cabezales estacionarios separados y se colocan en tanques o recipientes para efectuar el intercambio de calor, que se lleva a cabo principalmente a través de la superficie del tubo exterior.

**Cambiadores de doble tubo.** Se usan ampliamente en servicios con flujos pequeños y con rangos de temperatura grandes, y tienen aplicación en servicios a altas temperaturas y presiones. Las partes principales son dos juegos de tubos concéntricos separados y conectados mecánicamente para formar una horquilla, que puede disponerse en arreglos en serie o paralelo, para adaptarse a las necesidades del servicio particular.

- a) Cambiador de doble tubo.
- b) Cambiador de doble tubo en serie.
- c) Arreglo serie-paralelo.

### **3.2 Cambiadores de tubos múltiples.**

Los cambiadores de tubos múltiples constituyen la principal opción del diseñador para la mayoría de los servicios, excepto cuando se requiere enfriamiento con aire. La posibilidad de disponer de un amplio rango de formas y tamaños de sus partes constitutivas como longitud de tubos, diámetro y espaciamiento de tubos, número y espaciamiento de mamparas, entre otras, los hacen capaces de manejar adecuadamente casi cualquier flujo, carga térmica y caída de presión que requiera el servicio.

**Cambiadores de tubo y coraza.** De todos los tipos de cambiadores éste es el más usado, tanto, que frecuentemente se le considera como un estándar contra el que pueden compararse otros tipos de equipos.

- a) Cambiador de espejo fijo.
- b) Cambiador de tubo en U.
- c) Cambiador de anillo de cierre hidráulico.
- d) Cambiador de cabeza flotante con empaque exterior.
- e) Cambiador de cabeza flotante interno.
- f) Cambiador de cabeza flotante removible.

**Cambiador tubular tipo bayoneta.** Este equipo se usa como calentador de succión en tanques de almacenamiento para bombear fluidos viscosos y semiplásticos tales como melasas, aceites lubricantes pesados, combustibles y asfalto. El calor sólo se suministra mientras la bomba está en operación, a medida que el líquido caliente se extrae, se reemplaza por líquido remanente en el tanque a causa de la presión hidrostática.

**Cambiador de tubo en espiral.** El cambiador de tubos en espiral se usa en la industria como calentador o enfriador, aunque también puede usarse como condensador o vaporizador, reemplazando ocasionalmente a los intercambiadores de coraza y tubo, en servicios que tengan cargas térmicas y flujos pequeños, o en donde el espacio disponible imponga la necesidad de un equipo compacto, como el de tubos en espiral. El equipo consiste en varios tubos enrollados en espiral, que se colocan entre dos superficies planas, una de las cuales es la cubierta y la otra es la tapa.

### **3.3 Calentamiento externo.**

En las industrias químicas de proceso es necesario frecuentemente calentar las tuberías y los equipos, y hay muchas razones para esto. Muchos materiales se hacen viscosos o se solidifican aún a temperatura ambiente.

**Venas de calentamiento.** Aunque hay otras formas de calentar la tubería y el equipo, tales como los cables de calentamiento eléctrico o las chaquetas de calentamiento, las venas de calentamiento con vapor se usan más ampliamente.

**Recipientes enchaquetados.** Las chaquetas de calentamiento o enfriamiento se usan en recipientes que requieren limpieza frecuente y en recipientes con recubrimiento de vidrio en los que es difícil instalar otro medio de calentamiento.

- a) Chaqueta convencional.
- b) Chaqueta de hoyuelos.
- c) Chaqueta de serpentín de medio tubo.

### 3.4 Cambiadores de placas.

El hecho de que para la mayoría de los servicios de transferencia de calor el pasaje con forma rectangular sea más efectivo que el tubular, hace que los cambiadores de calor de placas sean una de las principales alternativas del diseñador en lugar del convencional de tubo y envolvente.

- a) Cambiador de placa.
- b) Cambiador de placa en espiral.
- c) Cambiador de placa y armazón.
- d) Cambiador de aleta y placa con soldadura fuerte.

### 3.5 Equipos especiales.

**Cambiadores de vidrio.** Cuando se requiere calentar, enfriar o condensar fluidos corrosivos, es posible usar este tipo de equipo. La superficie tan lisa del vidrio evita la formación de películas de suciedad mejorando la transferencia de calor y las paredes de vidrio permiten detectar fácilmente cuando la unidad requiere limpieza.

**Cambiadores de bloque de grafito.** La existencia de este tipo de cambiadores de calor se debe primordialmente a la necesidad de intercambio térmico con fluidos muy corrosivos en algunos procesos industriales. El cambiador de grafito puede aplicarse para: calentar fluidos corrosivos con vapor o fluidos calientes, enfriar fluidos corrosivos con agua o salmuera, condensación o evaporación, y reacciones que involucren la remoción o adición de calor.

**Cambiadores de teflón.** El hecho de que el teflón sea casi completamente inerte a la mayoría de productos químicos ha hecho posible el desarrollo de intercambiadores que usando tubos de este material, pueden manejar servicios muy corrosivos. Existen dos tipos principales de diseños, los haces de inmersión, que se utilizan más frecuentemente en los baños de tratamiento de superficies metálicas, y los intercambiadores de tubo y envolvente, que manejan el ácido sulfúrico, ácido crómico, nítrico o fosfórico, soluciones cáusticas, metanol, etc.

**Cambiadores de superficie raspada.** Estos cambiadores son una versión sofisticada de los de doble tubo, en la que el tubo interior cuenta con un dispositivo mecánico que raspa la superficie de transferencia, con el fin de incrementar la transferencia de calor y prevenir el ensuciamiento. Una de las principales aplicaciones consiste en la separación de componentes de una mezcla líquida por cristalización, también se usan cuando el producto manejado sea muy sucio e incrustante o tenga alta viscosidad, porque estos productos tienden a formar una película sobre la superficie de transferencia que obstruye el intercambio térmico. En el cambiador de superficie raspada esa película es removida constantemente por las navajas del mecanismo, asegurando una eficiente transferencia de calor.

### **3.6 Cambiadores de contacto directo.**

En un cambiador de contacto directo, el calor, así como la energía debida a la transferencia de masa se transmiten mediante contacto directo entre los fluidos caliente y frío. Generalmente, uno de los fluidos es un gas o vapor y el otro un líquido, inmiscibles entre sí, que pueden separarse fácilmente después del intercambio térmico.

**Evaporador de combustión sumergida.** Estos evaporadores de gases de combustión que se hacen burbujear a través del fluido de proceso para suministrar el calor necesario para la evaporación, consisten simplemente de un tanque para contener el líquido, un quemador, un distribuidor de gas que se introduce en el líquido y un sistema de control de combustión.

### **3.7 Equipos para fusión de sólidos.**

El equipo apropiado de la transferencia indirecta de calor para una operación no necesariamente será adecuado para la otra, debido al manejo de materiales más que a los aspectos térmicos. El hecho de si la temperatura de transformación es definida o se encuentra dentro de una gama tiene poca importancia en la selección de equipos para fusión.

**Tipo de tanque horizontal.** Se utiliza para transferir calor con el fin de fundir o cocer sólidos secos en polvo, derretir manteca para recuperarla de retazos de carne sólidos y desecar sólidos divididos.

**Tipo de caldera vertical agitada.** Se utiliza para cocer, fundir al estado líquido y proporcionar o retirar calor de reacción para sólidos que varían considerablemente en su cuerpo durante el proceso, de modo que el manejo del material es un problema real.

**Tipo de molino.** Se utiliza para amasar y calentar una mezcla de ingredientes sólidos y secos en polvo, con el fin de hacerlos reaccionar y reformarlos mediante la fusión, para obtener un producto consolidado.

### **3.8 Equipos para la desecación de sólidos.**

**Secadores directos.** La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación, es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

a) **Secadores continuos.** La operación es continua, sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes.

Secadores continuos de bandeja.

Secadores continuos de material dosificado en una capa.

Secadores de transportador neumático.

Secadores rotatorios.

Secadores por aspersion.

Secadores de circulación directa.

Secadores de túnel.

- b) **Secadores por lotes.** Los secadores se diseñan para operar a un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dados. En los secadores por lotes, las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

Secadores por lotes de circulación directa.

Secadores de bandejas y compartimientos.

**Secadores indirectos.** El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción de contacto.

- a) **Secadores continuos.** La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.

Secadores de cilindro.

Secadores de tambor.

Secadores de transportador de tornillo.

Secadores rotatorios de tubo de vapor.

Secadores de bandeja vibratorias.

- b) **Secadores por lotes.** En general, los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

Secadores por congelación.

Secadores rotatorios al vacío.

Secadores de bandejas al vacío.

**Hornos por lotes.** Éstos se emplean primordialmente para tratamientos térmicos de metales como templado, normalización y estiramiento, y para la desecación y la calcinación de artículos de cerámica.

- a) Hornos de tiro por convección forzada.
- b) Hornos con base de carro.
- c) Horno de hogar rotatorio.
- d) Hornos de tiro descendente.
- e) Hornos de tiro ascendente.

**Hornos continuos.** Las unidades se calientan con gas, petróleo o electricidad y usan circulación directa de los gases de combustión o placas internas para transmitir el calor. Los hornos continuos tienen con frecuencia una extensión adicional para enfriar la carga antes de exponerla al aire atmosférico.

- a) Hornos de túnel para cerámica.

## **CAPITULO IV**

### **TIPOS DE CALENTADORES**

#### **ELECTRICOS**

La siguiente lista intenta recopilar la mayor cantidad de calentadores eléctricos utilizados en la industria, mencionando sus mayores aplicaciones y las características principales que lo constituyen.

#### **4.1 Cables de Calentamiento.**

Los cables de calentamiento son usados para contrarrestar las pérdidas de calor de los equipos de proceso y de las tuberías a través del aislante. Un sistema de líneas de calentamiento es un grupo de equipos de proceso y tuberías que son calentados con cables y controlados de una manera lógica y económica. Existen muchas razones para recuperar el calor perdido de un sistema; ya que con cualquier pérdida de calor, hay una correspondiente caída de temperatura, que en muchos casos trae consecuencias inaceptables. Dichas consecuencias pueden ser el congelamiento de agua en líneas de agua de enfriamiento, en líneas de retorno de vapor o condensado, líneas de protección contra fuego, líneas de aire comprimido, tanques de almacenamiento, válvulas, etc. Si la temperatura de un fluido de proceso disminuye, puede provocar que la solución se precipite, que su viscosidad aumente o que se solidifique en la tubería. Aunque todos los cables de calentamiento son resistencias, cada uno de ellos tiene diferentes características de operación, estas características hace que unos tipos de cables den un mejor rendimiento para una aplicación en particular.

#### **Cables de calentamiento de autorregulación.**

Los cables de calentamiento de autorregulación como el mostrado en la figura 4.1, están diseñados y construidos para regular su propia producción, si la temperatura del proceso disminuye, la producción del cable se incrementa, y viceversa, si la temperatura del proceso aumenta, la producción del cable disminuye. El cable de autorregulación consiste de dos conjuntos paralelos de alambres, entre los cuales y a su alrededor está el núcleo generador de calor, y sobre este núcleo se encuentra una envolvente que es utilizada como aislante. Este tipo de cable de calentamiento es ideal para: protección contra el congelamiento en líneas de agua, para procesos que utilicen baja temperatura, y para tuberías de plástico o tanques.

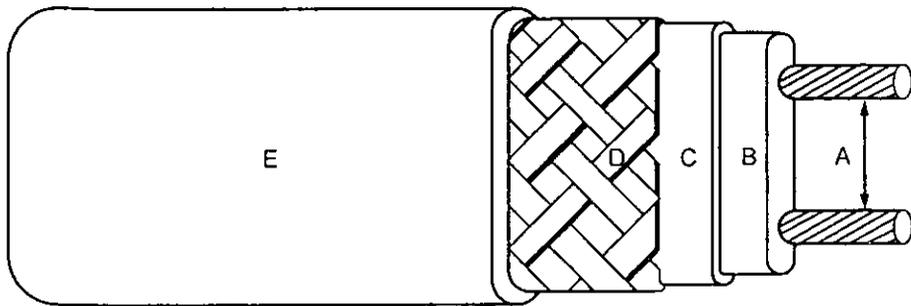


Fig. 4.1 Construcción estándar de los cables de autorregulación.

Principales materiales de fabricación.

A. Resistencias de calentamiento. Hechas de cobre, con un calibre comercial 16 AWG, proveen una buena capacidad de corriente.

B. Matriz. Núcleo de polímero semiconductor cuya resistencia eléctrica varía con la temperatura. Cuando la temperatura del proceso disminuye, el calor de salida del núcleo se eleva, e inversamente, cuando la temperatura del proceso se incrementa, el calor de salida se reduce.

C. Envoltente. Este aislante puede ser fabricado de un material de caucho termoplástico, el cual tiene una excelente resistencia al agua y a ciertos químicos ligeramente corrosivos, o de fluoropolímero, el cual es altamente resistente a la corrosión.

Opcional.

D. Trenzas de cobre estañado. Las trenzas opcionales que cubren la envoltente se usan cuando se requiere una protección mecánica.

E. La envoltente de TPR o de fluoropolímero protege las trenzas de cobre estañado, la envoltente de TPR presenta una buena resistencia a ciertas soluciones químicas inorgánicas, y la de fluoropolímero resiste materiales más corrosivos.

### Cables de calentamiento de potencia constante.

La construcción de los conjuntos de alambres (figura 4.2), y sus características de salida uniformes hacen que tengan una aplicación fácil en el campo. Sus aplicaciones principales en la industria son: mantener la temperatura de un proceso y proteger las tuberías contra el congelamiento.

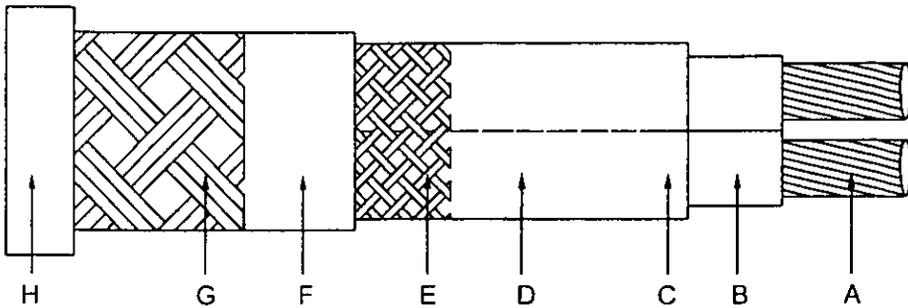


Fig. 4.2 Construcción estándar de los cables de potencia constante.

- A. Resistencias de calentamiento. Hechas de cobre, con un calibre comercial de 12 AWG, proveen una confiable y consistente corriente eléctrica.
- B. Aislante de las resistencias de calentamiento. Protege y aísla eléctricamente las resistencias.
- C. Envoltorio interior. Esta envoltura rodea las dos resistencias de calentamiento.
- D. Alambre de Nichrome. Esta resistencia es el componente de calentamiento del cable.
- E. Trenzas de fibra de vidrio. Asegura el alambre de calentamiento de nichrome y resalta el carácter mecánico de la construcción.
- F. Envoltorio. Fabricada de teflón, le da una protección al cable y le asegura un tiempo de vida largo, este material es también altamente resistente a la corrosión. Opcional.
- G. Trenzas de metal.
- H. Envoltorio para altas temperaturas. Fabricada de teflón, ofrece una protección contra soluciones químicas corrosivas.

### Cables de calentamiento con aislante mineral.

Los cables de calentamiento con aislante mineral son los tipos de cable más durables que existen. Debido a su construcción (figura 4.3), pueden tener un calor de salida muy alto, el cual puede ser usado en algunas aplicaciones de calentamiento de procesos. Estos cables de calentamiento consisten de uno o dos alambres resistores rodeados por óxido de magnesio altamente compactado, el cual, a su vez está cubierto con una envoltura de metal. Dentro de sus aplicaciones podemos encontrar: protección contra el congelamiento de tuberías y tanques, y mantener la temperatura de procesos como líneas de vapor, plantas de asfalto y áreas de procesamiento químico y petroquímico.



Fig. 4.3 Construcción estándar de los cables con aislante mineral.

### 4.2 Calentadores de Tira.

Los calentadores de tira son usados principalmente para el calentamiento de aire por convección y para el calentamiento de tanques, moldes, etc., utilizando la aplicación tipo abrazadera. Cuando seleccionamos los calentadores de tira para cualquiera de las dos aplicaciones, debemos tomar en cuenta dos importantes factores:

- a) El material de la envoltura debe ser el apropiado para resistir cualquier corrosión u oxidación inherente al proceso o provocada por el medio ambiente, y para soportar la temperatura requerida de la envoltura. Los materiales estándar

de la envolvente son el fierro resistente a la corrosión, el acero cromado y el Incoloy. Las envolventes de acero inoxidable y Monel también están disponibles.

- b) El flujo térmico del elemento, o los watts por pulgada cuadrada de área calentada, debe ser bajo para el calentamiento de asfalto, molasas y otras sustancias densas con baja transferencia de calor; puede ser más alto para el calentamiento de aire, metales u otros materiales conductores de calor.

Tipos de calentadores de tira.

- a) Calentadores de tira con una terminal en cada extremo.
- b) Calentadores de tira con dos terminales en uno de sus extremos (figura 4.4).
- c) Calentadores de tira con dos terminales centradas.
- d) Calentadores de tira con tres terminales.
- e) Calentadores de tira con envolvente de Incoloy sin costura.
- f) Calentadores de tira de alta temperatura.
- g) Calentadores de tira sin costura y sin asas montadas.
- h) Calentadores de tira aletados.
- i) Calentadores de tira tipo anillo.

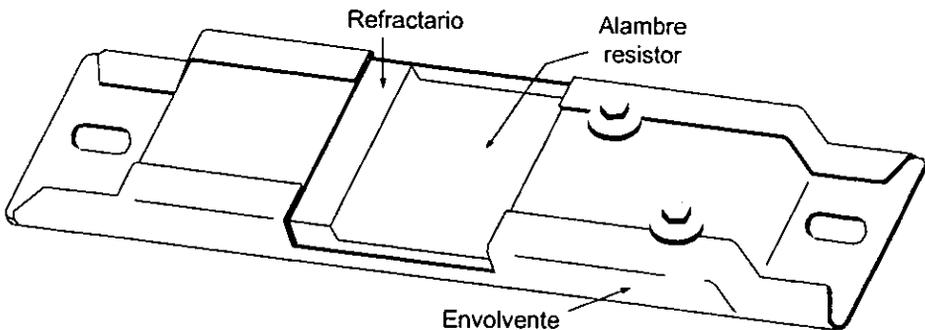


Fig. 4.4 Calentadores de Tira.

### 4.3 Calentadores de Cartucho.

Los calentadores de cartucho son usados frecuentemente para el calentamiento de partes de metal insertándolos en orificios perforados. El calentamiento de moldes, placas sólidas, etc., puede ser llevado a cabo fácilmente con los calentadores de cartucho, aunque en algunas aplicaciones los calentadores tubulares también pueden ser insertados en los orificios. Cuando se están utilizando estos calentadores, como el de la figura 4.5, es esencial que se verifiquen los siguientes factores para asegurar que el tiempo de vida del calentador sea el más largo posible y que proporcione el calor suficiente al trabajo que se esté llevando a cabo.

- a) Flujo térmico en la envolvente.
- b) El conveniente empalme del calentador de cartucho en las perforaciones.
- c) Las medidas tomadas para proteger el calentador de la contaminación de aceite, de los vapores del aceite, etc.
- d) Si están instalados los suficientes kW para llevar a cabo el trabajo y recuperar el calor perdido de la superficie plana.

Tipos de calentadores de cartucho.

- a) Calentadores de alto flujo térmico con envolvente de incoloy.
- b) Calentadores de alto flujo térmico con envolvente de acero inoxidable.

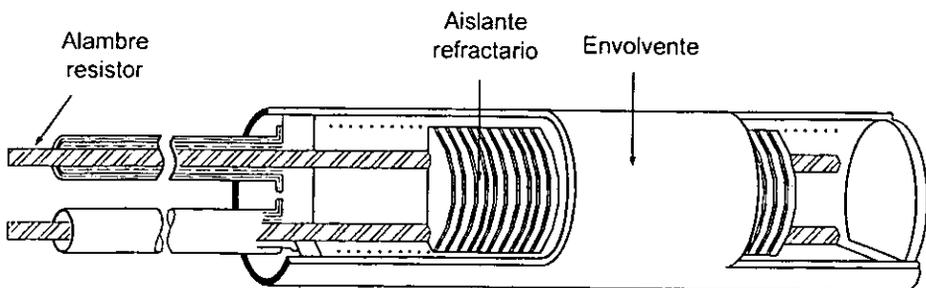


Fig. 4.5 Calentadores de Cartucho

#### 4.4 Calentadores Tubulares.

Los elementos de calentamiento tubulares han tenido un enorme incremento en la escala de aplicaciones del calentamiento eléctrico, ya que estos proporcionan la cantidad exacta de calor requerido a un área determinada. Los calentadores tubulares presentan básicamente tres formas geométricas diferentes: sección transversal redonda (figura 4.6), la cual es altamente adaptable cuando los elementos deben ser doblados, sección transversal triangular y; sección transversal triangular aplanada. Los elementos tubulares se utilizan para prácticamente todo el intervalo de calentamiento de las resistencias eléctricas, el material de la envolvente debe ser el adecuado para resistir cualquier oxidación inherente al proceso o provocada por el medio ambiente, y para soportar la temperatura que requiere la envolvente.

Tipos de calentadores tubulares.

- a) Calentador tubular con un corte transversal en forma de corazón (triangular).
- b) Calentadores tubulares aletados.
- c) Calentadores tubulares con un corte transversal redondo.
- d) Calentadores tubulares con un corte transversal triangular aplanado.

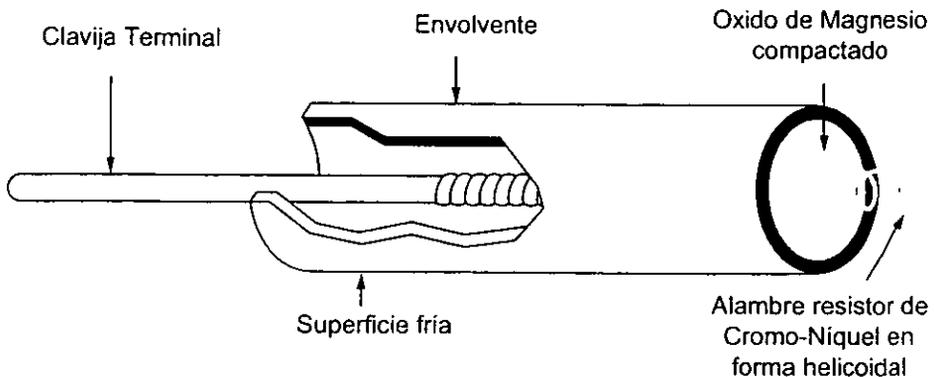


Fig. 4.6 Calentadores Tubulares.

#### 4.5 Calentadores de Inmersión.

Los calentadores de inmersión de collarín roscado, como el mostrado en la figura 4.7, consisten de elementos tubulares doblados como horquillas que están soldados en un collarín roscado y provistos con cajas de instalación eléctrica para las conexiones eléctricas. Los calentadores de inmersión de collarín roscado son utilizados para el calentamiento de líquidos y gases en una variedad de procesos. Estos calentadores son los ideales para procesos de calentamiento de agua y para protección contra el congelamiento, pero también se pueden ocupar para calentar todos los tipos de aceites y las soluciones de transferencia de calor. El método de la inmersión directa es eficiente en energía y bien adaptable a muchas aplicaciones. Los calentadores de inmersión bridados consisten de elementos tubulares doblados como horquillas que están soldados a bridas y provistos con cajas de instalación eléctrica para las conexiones eléctricas. Los calentadores con bridas están diseñados para utilizarse en tanques y recipientes presurizados, se pueden instalar y mantener muy fácilmente para que proporcionen calor para muchos procesos, la instalación se lleva a cabo pernándolos a otra brida que se encuentra soldada a la pared del tanque o recipiente. Este tipo de calentadores es uno de los métodos más ampliamente usado para el calentamiento de gases y líquidos (tales como el agua, el aceite, los fluidos de transferencia de calor y las soluciones corrosivas).

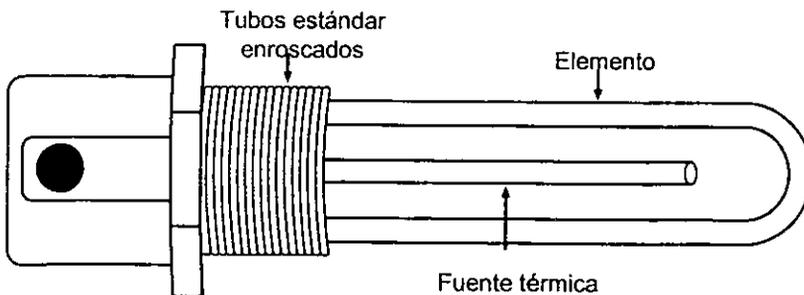
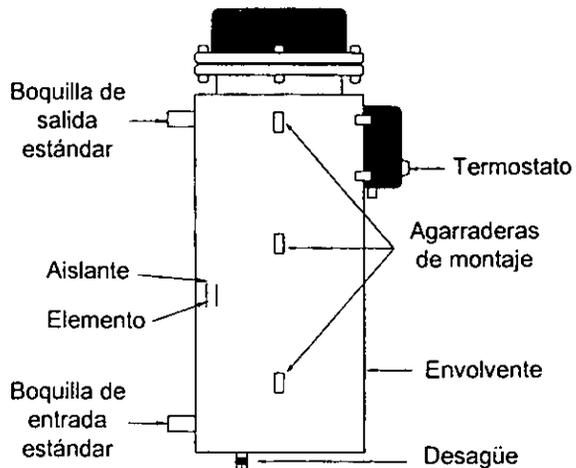


Fig. 4.7 Calentadores de Inmersión

#### 4.6 Calentadores de Circulación.

Los calentadores de circulación (ver figura 4.8), son unidades empacadas diseñadas para calentar un flujo medio para operaciones en línea o ramificadas. Estos calentadores consisten de elementos de calentamiento integrados, cuerpo de calentamiento, termostato, aislante, soportes montados y conexiones externas e internas. Todo el calor es generado dentro de la solución con este tipo de calentador, por lo que siempre se tiene una eficiencia de calentamiento alta, además, cuando los fluidos pasan directamente por los elementos de calentamiento se forma una distribución de calor pareja. Las aplicaciones típicas de los calentadores de circulación incluyen el calentamiento de agua, aceites, fluidos de transferencia de calor, fluidos corrosivos, gases y vapor. Los calentadores pueden ser montados a un costado de los tanques o instalados en línea para el calentamiento del proceso. La aplicación del calentador está influenciada por los siguientes parámetros: viscosidad, calor específico, densidad y propiedades corrosivas del medio calentado, contaminantes presentes en el medio, propiedades de resistencia a la corrosión del material de la envolvente del calentador, el flujo térmico del elemento de calentamiento y el material de la coraza.

Fig. 4.8 Calentadores de Circulación.



#### 4.7 Calentadores de Banda.

Los Calentadores de Banda caen en dos clasificaciones; cilíndricos y de boquilla, estos calentadores (fig. 4.9), están diseñados específicamente para aplicar calor por convección a superficies cilíndricas. Las aplicaciones típicas para los calentadores tipo cilindro incluyen el calentamiento de cilindros de moldes de inyección de plásticos y extrusores, calentamiento de kettles y lechos fluidizados. Los calentadores tipo boquilla, son más pequeños en diámetro que los otros, y son usados para calentar boquillas de acero blando. Los dos tipos generalmente se diseñan para reemplazar equipos originales en máquinas de moldeo de inyección y para calentar secciones de tuberías de hasta 20 pulgadas de diámetro externo.

Tipos de Calentadores de Banda.

- a) Aislado con mica de una y/o dos piezas (MB).
- b) Tipo cilindro de banda flexible (DB y DBW).
- c) Tipo cilindro tubular (HBT).
- d) Tipo tira (HB).
- e) Tipo boquilla ((HBA y HBZ).

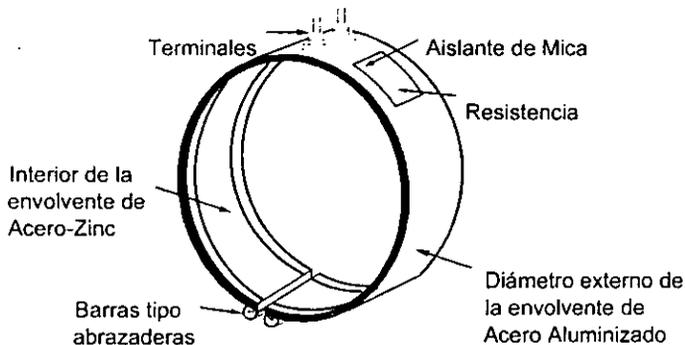


Fig. 4.9 Calentadores de Banda

## **CAPITULO V**

### **SELECCIÓN DE MATERIALES**

### **DE CONSTRUCCION**

Las construcciones de los calentadores eléctricos no están limitadas a envoltentes de metal, aunque estos materiales son los más populares y usualmente los de menor costo total. Otros tipos de construcciones pueden usar teflón u otros materiales aislantes sintéticos para cubrir al elemento de calentamiento; cada diseño y construcción son especialmente hechos para resolver un problema o aplicación en específico. De los diferentes tipos de elementos de calentamiento, los más seguros y confiables son los elementos que utilizan una envoltente como protección, en este tipo de construcción, el alambre resistor, el cual conduce la electricidad y genera calor, está rodeado por un material aislante tipo refractario y por una envoltente de metal protectora, la cual evita cualquier daño físico, ayuda a mejorar la conductividad térmica y reduce el riesgo de un shock eléctrico, además, ofrece una seguridad que permite el contacto directo o la inmersión directa en fluidos, o ser afianzados con abrazaderas a los contenedores. Los elementos constructivos de los calentadores eléctricos en los que se pondrá mayor atención al seleccionar sus materiales, son aquellos sujetos a presión, ya que la corrosión puede llegar a destruir el material útil para soportarla, por lo que siempre que sea posible se incluirá un espesor adicional al requerido por presión, dando con ello material disponible para los efectos corrosivos sin que el equipo sufra daños de consideración durante su vida útil.

### **5.1 Factores que intervienen en la selección de materiales.**

La selección de los materiales que habrán de utilizarse para la fabricación de las partes constitutivas de los calentadores eléctricos, se realiza mediante el análisis de todos y cada uno de los factores que pueden intervenir en la seguridad, durabilidad y funcionamiento del equipo. Los factores que mayor influencia tienen en la selección son: la corrosión, la presión y la temperatura, aunque generalmente deben tomarse en cuenta otros aspectos, tales como: soldabilidad, facilidad de maquinado, disponibilidad en el mercado y costo relativo.

## **Corrosión.**

En términos técnicos, la corrosión se define como el deterioro o pérdida de material de un metal por el ataque electroquímico del medio que le rodea. Todos los metales y aleaciones son susceptibles a la corrosión, no existiendo material útil para todas las aplicaciones, pero afortunadamente existen materiales que pueden comportarse satisfactoriamente en medios específicos. Para fines prácticos es casi imposible eliminar la corrosión, por lo cual se busca más su control que su eliminación, de aquí la importancia del entendimiento de los mecanismos de la corrosión a fin de tomarlos en cuenta desde el diseño. En términos generales, los procesos de la corrosión se clasifican en dos grupos: corrosión por oxidación y corrosión galvánica.

### **a) Corrosión por oxidación.**

La corrosión por oxidación es esencialmente un proceso electroquímico, que da lugar a que un metal se transforme total o parcialmente al estado iónico. Para que exista corrosión, es necesario que se establezca el paso de una corriente eléctrica entre zonas distintas de una superficie o distintas superficies metálicas en contacto con el electrolito, en las que dichas superficies actúen como electrodos de pilas microscópicas, donde unas tendrán la función de ánodo y otras de cátodo, debiendo tener éstas una diferencia de potencial y que trabaje como puente eléctrico el electrolito que tenga átomos o grupos de átomos desbalanceados eléctricamente, llamados iones. Puede decirse que la corrosión depende del electrolito o de los productos químicos que lo forman, por lo que en nuestro caso los electrolitos son los fluidos de proceso y su comportamiento depende de la concentración de los compuesto químicos corrosivos.

### **b) Corrosión galvánica (bimetálica).**

Este tipo de corrosión se presenta cuando se unen o están conectados por un electrolito dos metales de diferente potencial, y uno de ellos, el menos noble, hace la función de ánodo y el otro la función de cátodo. Como el material que se corroe es el menos noble, siempre debe tenerse cuidado al seleccionarlo, recomendando que su área de trabajo sea mayor que la del cátodo.

## **Temperatura.**

La temperatura es un factor importante en la selección de los materiales, ya que al variarla se producen cambios en las propiedades mecánicas de éstos. Si se toma como referencia la temperatura ambiente, se podrá hablar de altas y bajas temperaturas, aunque resulte relativo, ya que existen materiales con un bajo punto de fusión, como es el caso del estaño 500K (450°F) en el que la temperatura ambiente se puede considerar alta, y existen materiales con un alto punto de fusión, como el tungsteno 3683K (6170°F), para los cuales la temperatura ambiente resultaría baja. Sin embargo se toma como referencia la temperatura ambiente, ya que todas las propiedades de los materiales están determinadas en este rango de temperaturas.

### **a) Altas temperaturas.**

Las propiedades mecánicas de los materiales a la temperatura ambiente, presentan valores que sufrirán cambios cuando se presenten incrementos de temperatura, por lo que se tendrá que tomar en cuenta las siguientes consideraciones: los esfuerzos máximos a la tensión y cedencia disminuirán de acuerdo a la elevación de temperatura, con lo que también disminuyen los esfuerzos permisibles de operación, además disminuyen la dureza y la fragilidad, mientras que la tenacidad, la maleabilidad y la ductibilidad aumentan.

### **b) Bajas temperaturas.**

Al disminuir la temperatura, también se ocasionan variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales, siendo las más importantes: los esfuerzos últimos a la tensión y de cedencia, que aumentan junto con la dureza, mientras que la tenacidad, ductibilidad y maleabilidad disminuyen. El cambio más peligroso en las propiedades de los materiales causado por baja temperatura, será el de pasar de tenaz a frágil, ya que en algunos materiales este cambio se presenta en forma brusca, existiendo por consecuencia la posibilidad de fractura originada por choque o alguna concentración de esfuerzos.

### **Presión.**

Los calentadores eléctricos estarán diseñados para resistir presiones que harán trabajar algunos de sus elementos a tensión. La presión no causará variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales, pero para resistir los esfuerzos generados por ella, el material seleccionado deberá poseer resistencia a dichos esfuerzos. En realidad muchos materiales pueden resistir los esfuerzos desarrollados por la presión, pero los que tienen baja resistencia a la tensión, necesitarán de un gran espesor. En el cálculo de espesores necesarios para la presión, se deberán utilizar los esfuerzos permisibles a la temperatura de diseño.

## **5.2 Selección del material para los elementos principales.**

### **Resistencias.**

- a) El corazón del elemento de calentamiento es el alambre resistor, este alambre resiste el flujo de corriente eléctrica de tal modo que se genera calor, los materiales más comunes que se utilizan para la fabricación del alambre de resistencia son aleaciones de Níquel-Cromo de alta calidad, o aleaciones compuestas de Hierro, Cromo y Aluminio (ver tabla 5.1).
- b) El principal material de aislante refractario utilizado para cubrir el alambre resistor en los calentadores eléctricos tubulares y de cartucho, es el Óxido de Magnesio (MgO) fundido, este material tiene una alta resistencia eléctrica a elevadas temperaturas y una excelente conductividad térmica, no es muy abrasivo, es inerte, generalmente no tóxico y tiene un costo relativamente bajo.
- c) El material de la envolvente externa es determinado por la aplicación final de uso, los cuatro materiales más utilizados para la envolvente de metal de los calentadores eléctricos son: el Cobre, el Acero, el Acero inoxidable y el Incoloy. El Cobre es más ocupado para aplicaciones de calentamiento de agua, el Acero para aceites, el Acero inoxidable y el Incoloy para soluciones corrosivas o aplicaciones de alta temperatura como el calentamiento de gases. Otros materiales disponibles para aplicaciones especiales son: Acero cromado, Hierro, Inconel, Monel, Hastelloy y Titanio (ver tabla 7.2 en el anexo II).

**Tabla 5.1 Materiales para fabricar los elementos para calentamiento por resistencia.**

Material	Temp. máx. de Operación en aire seco, °C	Resistividad a 20°C, Ωm	Coefficiente de Resistividad en el intervalo de operación a la temperatura media	Aplicaciones principales
Cobre	350	$1.72 \times 10^{-8}$		Calentadores superficiales de baja potencia
<b>Aleaciones de níquel *</b>				
80-20 Ni-Cr	1200	$108 \times 10^{-8}$	$6 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos; calentadores de resistencia
80-20 Ni-Cr + Al	1250	$124 \times 10^{-8}$	$-2 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos; el más bajo costo
60-15-25 Ni-Cr-Fe	1100	$112 \times 10^{-8}$	$13 \times 10^{-4}$	Elementos de calentamiento de hornos; el más bajo costo
50-18-32 Ni-Cr-Fe	1075	$111 \times 10^{-8}$	$17 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos; el más bajo costo
37-18-43-2 Ni-Cr-Fe-Si	1050	$105 \times 10^{-8}$	$24 \times 10^{-4}$	Elementos de calentamiento de hornos; el más bajo costo
44-56 Ni-Cu	400	$49 \times 10^{-8}$		Calentadores de resistencia; aplicaciones domésticas
<b>Aleaciones a base de hierro*</b>				
72-22-4 Fe-Cr-Al	1050	$139 \times 10^{-8}$	$4.7 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos
72-22-4 Fe-Cr-Al + Co	1375	$145 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos
78-16-4 Fe-Cr-Al + Yt,C	1300	$134 \times 10^{-8}$	$12 \times 10^{-5}$	Elementos de calentamiento de hornos
<b>Metales refractarios</b>				
Platino	1300	$11 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-1}$	Hornos de mufla pequeños
90-10 Pt-Rh	1550	$19.2 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-5}$	Hornos de mufla pequeños
60-4-0 Pt-Rh	1800	$17.4 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-1}$	Hornos de mufla pequeños
Molibdeno	1750 <sup>1</sup>	$5.7 \times 10^{-8}$	$5.5 \times 10^{-1}$	Hornos de vacío; hornos de mufla pequeños, en atmósfera de hidrógeno
Tantalio	2500	$12.5 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-1}$	Hornos de vacío
Tungsteno	1800 <sup>1</sup>	$5.6 \times 10^{-8}$	$5.94 \times 10^{-1}$	Lámparas infrarrojas; hornos de vacío
<b>No metales</b>				
Grafito	3000 <sup>1</sup>	$1000 \times 10^{-8}$	$-2.66 \times 10^{-2}$	Hornos de vacío; atmósferas reductoras
Bisulfuro de molibdeno	1800	$40 \times 10^{-8}$	$1.02 \times 10^{-2}$	Pequeños hornos de fundición de vidrio; hogar frontal
Carburo de silicio	1600	$1.1 \times 10^{-1}$	$-2.63 \times 10^{-4}$	Elementos de calentamiento de hornos; atmósferas oxidantes y reductoras
Cromito de lantano	1800	$2 \times 10^{-5}$		

\* Sólo composiciones aproximadas

<sup>1</sup> Sin aire

### **Espejos.**

El material de construcción de los espejos debe seleccionarse para satisfacer el ataque corrosivo y las condiciones de servicio del fluido, en especial si es un fluido crítico. A estos elementos se les puede adicionar material disponible para la corrosión, por lo que generalmente se fabrican de Acero al carbono SA-105 (consultar la tabla 5.2 para ver su composición), pero debido a que las resistencias irán insertadas en ellos, quedando expuesta su unión a la acción del fluido, el material de los espejos deberá ser del mismo material que el de las resistencias u otro de las mismas características electroquímicas, para evitar que se desarrolle un ataque de corrosión bimetalica (galvánica). Cuando las resistencias están hechas de Cobre o de alguna de sus aleaciones, se tienen problemas para fabricar los espejos de estos mismos materiales, esto es debido a que tienen bajos esfuerzos permisibles que bajan aun más al elevarse la temperatura, por lo que necesitarán de un espesor mayor que el Acero al carbono SA-105, pero este aumento provoca que el costo sea mayor y por lo tanto sería antieconómico. Es entonces cuando dichos espejos se fabrican de Acero al carbono SA-105 con un recubrimiento integral de Cobre o de alguna de sus aleaciones, aunque en ocasiones se fabrican totalmente de estos últimos materiales cuando el diámetro del equipo es menor a 1016 mm (40 pulg.), la presión baja y la temperatura moderadamente alta.

### **Empaques.**

En las juntas desmontables de los calentadores eléctricos se utilizan empaques de metal sólido o de asbesto comprimido recubierto de un metal (enchaquetado). Los empaques llamados enchaquetados, deben tener una buena plasticidad para que al ser comprimidos, puedan deformarse y fluir hasta llenar todos los huecos existentes en las caras de asentamiento, evitando así cualquier fuga. El metal que recubre el asbesto deberá seleccionarse para resistir el ataque corrosivo del fluido que se maneja, por lo que generalmente se adopta un metal igual o de las mismas características electroquímicas que las de los elementos en que se asienta, para evitar que se genere un ataque de corrosión bimetalica.

### **Bridas.**

Normalmente son fabricadas de Acero al carbono SA-105, o de un Acero al carbono similar al de las partes a las que han de soldarse, y únicamente en casos muy especiales se fabricarán de otro material, puesto que se les puede adicionar material disponible para la corrosión. Siempre que un espejo y empaque de material diferente al Acero al carbono utilizado deban formar junta con una brida, ésta podrá ser fabricada de ese Acero al carbono, recubriéndola en la cara de asentamiento del empaque con material igual o de características electroquímicas similares a las del empaque de tal forma que éste se apoye en su totalidad sobre el recubrimiento, para evitar que se produzca un ataque de corrosión bimetalica. El espesor del material de recubrimiento será normalmente de 3 mm (1/8 pulg.) y será aplicado mediante soldadura.

### **Envolventes, Canales, Tapas y Boquillas.**

Estos elementos contendrán al fluido de proceso y soportarán su presión, se fabrican normalmente de Acero al carbono SA-516 ó SA-106 (ver tabla 5.2) cuando las temperaturas son ambientales o moderadamente altas, ya que se puede agregar material disponible para la corrosión y solo en ocasiones muy especiales se fabrican de materiales de mejor calidad. La construcción de estos elementos se lleva a cabo a partir de diversas formas de suministro, como el caso de las envolventes y canales que algunas veces se obtienen de tubos cédula y otras de placa, las tapas de placa y las boquillas de tubo cédula, por lo que deberá seleccionarse la forma de suministro.

### **Soportes.**

Los soportes están fabricados normalmente del mismo Acero al carbono que se utiliza para la envolvente, y generalmente se emplean para soportar el peso de las resistencias cuando éstas llegan a tener unas longitudes tales, que su propio peso sobrepasa el que puede soportar el espejo al cual se encuentran unidas, con lo cual llegarían a sufrir una deformación y por consecuencia una ruptura en el punto de unión con el espejo.

**Tabla 5.2** Composiciones de algunos Aceros al carbono.

Material	Elemento	Composición, %
SA-105	Carbono	0.35 máx.
	Manganeso	0.60-1.05
	Fósforo	0.040 máx.
	Sulfuro	0.050 máx.
	Silicón	0.35 máx.
SA-106 Grado C	Carbono	0.35 máx.
	Manganeso	0.29-1.06
	Fósforo	0.048 máx.
	Sulfuro	0.058 máx.
	Silicón	0.10 min.
SA-516 Grado 70	Carbono	0.30 máx.
	Manganeso	0.85-1.20
	Fósforo	0.035 máx.
	Sulfuro	0.04 máx.
	Silicón	0.15-0.30

### 5.3 Fallas en los calentadores eléctricos.

La vida útil de la envolvente de metal del calentador eléctrico, depende primeramente de la temperatura de operación de la envolvente y de los efectos corrosivos del medio que se está calentando. Los elementos con envolvente de metal usualmente proveen un tiempo de vida largo porque el resistor está envuelto con un material refractario que no permite el contacto directo con el aire, esta protección reduce la rapidez de oxidación del metal. Como una regla general, alcanzar la temperatura de operación de la envolvente del calentador tiene un efecto adverso en la vida del calentador, los elementos de calentamiento eléctrico han sido diseñados para operar a la temperatura de la envolvente o hasta 1145K (1600°F), o un poco más alta si la aplicación es muy especial.

En teoría, muchas resistencias fabricadas con aleaciones pueden operar cerca de su temperatura de fusión, que es cercana a los 1533K (2300°F), pero el límite práctico recomendado para la temperatura de operación de la envolvente es aproximadamente 1033K (1400°F). Esto es porque hay un gradiente del alambre a través del MgO a la superficie externa de la envolvente, operar los calentadores a temperaturas por encima de estas recomendaciones puede reducir enormemente la vida del calentador.

#### **Contaminación de la terminal o del MgO.**

Una causa común de los problemas del servicio del calentador es la contaminación de la terminal o el refractario, esto provoca que la resistencia del aislante disminuya, lo cual provoca un colapso dieléctrico y por consiguiente, la falla del calentador. La humedad es la que provoca frecuentemente la falla dieléctrica, pero también puede ser resultado de la contaminación hecha por aceites, ácidos, sales o vapor. La acumulación de contaminantes en las terminales, aislantes, conectores eléctricos y terminales expuestas del calentador, pueden causar un colapso en el material aislante, dando como resultado un corto circuito.

#### **Temperatura de operación muy alta en la envolvente.**

El flujo térmico varía porque depende del medio de calentamiento y de la aplicación, por ejemplo, los elementos que son utilizados para el calentamiento de agua, son frecuentemente diseñados para operar a un flujo térmico de 75 watts/pulg<sup>2</sup> o más alto. Debido a que el agua tiene un calor específico alto y es un excelente conductor térmico, la energía se absorbe rápidamente y es conducida lejos del elemento de la envolvente, sin embargo, este mismo diseño no sería satisfactorio para la aplicación del calentamiento del aire porque este medio es un pobre conductor térmico y no absorbería rápidamente la energía. El diseño del flujo térmico para el calentamiento de aire, vapor o líquidos viscosos son usualmente mucho más bajos para prevenir el sobrecalentamiento y un tiempo de vida corto.

Las fallas de los elementos debido al sobrecalentamiento, son fácilmente determinadas examinando la apariencia de la envolvente del calentador. Cuando la temperatura de operación del elemento de calentamiento excede la máxima temperatura diseñada, el alambre de resistencia se funde internamente, esta condición puede resultar en un circuito abierto o, más frecuentemente, el metal fundido penetra el material refractario provocando un corto circuito en la envolvente, el resultado de este corto circuito puede originar orificios en el material de la envolvente. Otros indicios de falla provocados por el sobrecalentamiento pueden ser el color y la condición de la envolvente, por ejemplo, los elementos de cobre cambian de coloración cuando operan por encima de los 506K (450°F) y cuando están expuestos a atmósferas de aire o vapor, otros materiales se decoloran o se ennegrecen como resultado de las temperaturas excesivas.

Existen muchas causas potenciales del sobrecalentamiento del elemento, en la aplicación de calentamiento de líquidos, las fallas del sobrecalentamiento pueden ocurrir por las pérdidas de fluido provocadas por la evaporación, por el mal funcionamiento de las bombas, por un drenaje impropio, etc. Estas fallas pueden ser prevenidas o minimizadas por el uso de controles de proceso adecuados, por controles de nivel de líquido y con un buen programa de mantenimiento.

### **Corrosión de la envolvente.**

Hay algunos metales y aleaciones exóticas que presentan un amplio intervalo de resistencia a las condiciones y materiales corrosivos, pero estos materiales pueden ser insatisfactorios en una aplicación en particular. La corrosión química y la falla de la envolvente pueden ocurrir por el ataque de ácidos, álcalis, o por cualquier número de fuentes desconocidas, otro tipo de falla por corrosión es causada por la incrustación en la envolvente del calentador, el proceso de la corrosión es acelerado por el calentamiento y contención de agentes corrosivos, generalmente, esto provoca que la envolvente sea rápidamente destruida, produciéndose perforaciones y rajaduras en ella.

**Daño físico.**

El daño físico y mecánico usualmente ocurren cuando la alta velocidad de los fluidos o la turbulencia provocada por los agitadores causan vibración y erosión en el metal, algunos de estos daños físicos pueden ser: la fatiga del metal, que es provocada por la flexión constante de la envolvente y, la abrasión, la cual es causada por la fricción contra los soportes. Este tipo de daño puede ser reducido o prevenido, si se conocen las condiciones más extremas de operación antes de diseñar el equipo y el sistema.

## **CAPITULO VI**

### **DIMENSIONAMIENTO**

### **TERMODINAMICO**

Muchos materiales, sean gases, líquidos o sólidos pueden ser calentados con resistencias eléctricas por conducción, convección o radiación. Existen algunos requerimientos básicos que se necesitan cubrir para poder utilizar un calentador eléctrico.

**Temperatura final que se desea alcanzar.**

Los calentadores con resistencias eléctricas normalmente operan de rangos criogénicos de  $-300^{\circ}\text{F}$  o más bajo, hasta aproximadamente  $1500^{\circ}\text{F}$ .

**Material de la envolvente requerida.**

La siguiente tabla nos muestra la temperatura máxima que pueden soportar algunos materiales, si se desea utilizar un material distinto consultar la tabla 7.3 del anexo II.

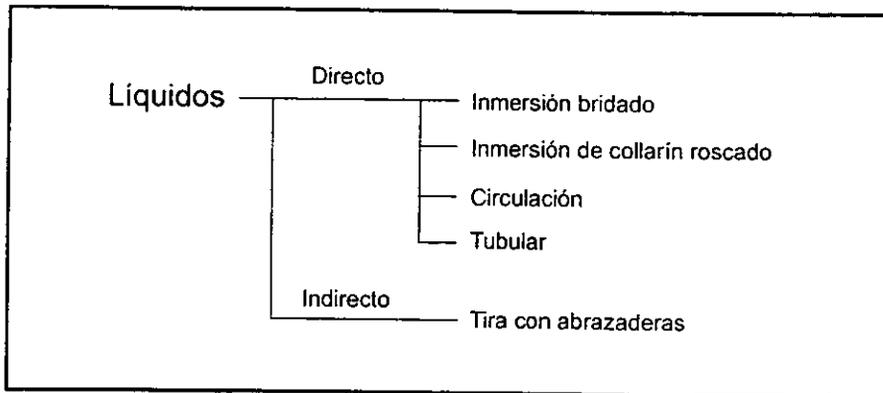
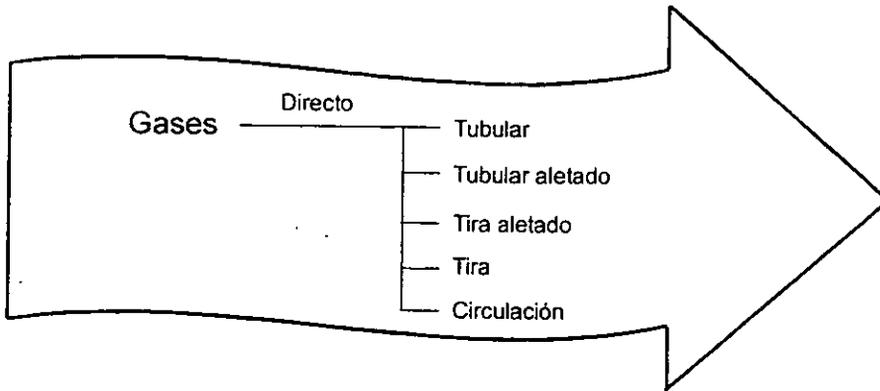
**Tabla 6.1** Temperatura máxima de trabajo.

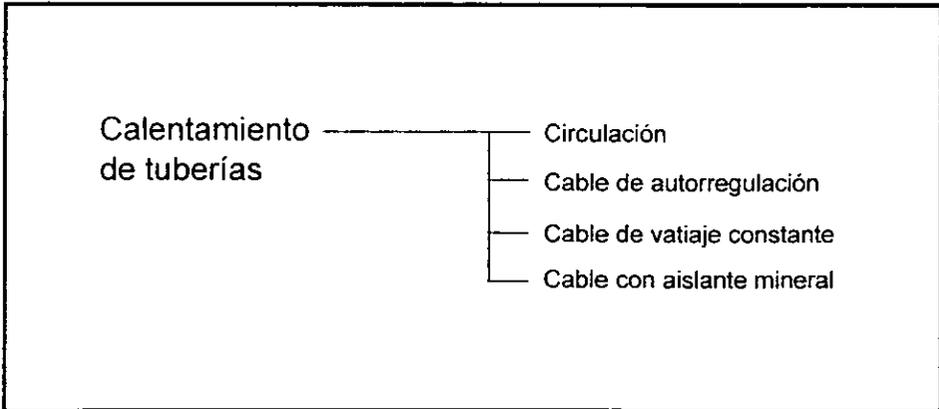
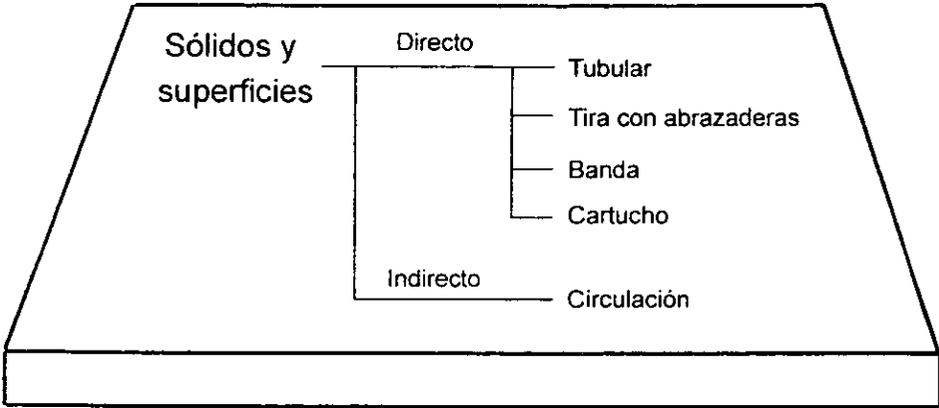
Cobre	$350^{\circ}\text{F}$
Acero	$750^{\circ}\text{F}$
Fierro resistente a la corrosión	$750^{\circ}\text{F}$
Monel	$950^{\circ}\text{F}$
Acero cromado	$1200^{\circ}\text{F}$
Acero Inoxidable	$1250^{\circ}\text{F}$
Incoloy	$1500^{\circ}\text{F}$

**Flujo térmico permitido.**

El flujo térmico o flux de calor, son los watts emanados de una pulgada cuadrada de área superficial calentada del calentador. Algunas sustancias como el agua pueden tomar un flujo térmico alto, mientras que otras, como los aceites del petróleo, deben usar flujos térmicos bajos, ya que estas sustancias no pueden absorber fácilmente el calor que está siendo generado. En la tabla 7.1 del anexo II se muestran muchos fluidos comunes con sus respectivos flujos térmicos, hay que tener cuidado de no sobrepasar estos valores máximos permitidos.

Debido a que existe una gran variedad de calentadores eléctricos, estos se pueden clasificar de acuerdo al estado físico del material que se está calentando. Los siguientes diagramas nos reducen el número de calentadores eléctricos que se pueden utilizar para una aplicación determinada.





## 6.1 Calor perdido.

Conociendo el estado físico del material podemos determinar la capacidad total en kilowatts que nos debe proporcionar el calentador eléctrico para realizar el trabajo, para esto es necesario calcular la cantidad de energía que se requiere para llevar la aplicación desde la temperatura inicial hasta la temperatura de operación en el tiempo deseado, y obtener la capacidad en kilowatts para mantener la temperatura de operación. La capacidad total de kilowatts que se deben instalar será la que resulte más grande entre los requerimientos del calentamiento inicial,  $Q_{ti}$ , y los requerimientos para mantener la temperatura de operación,  $Q_{to}$ . A continuación se presenta la secuencia de cálculo para obtener el calor perdido por gases, líquidos, sólidos y tuberías.

### Gases.

#### Información básica.

Temperatura inicial del gas,  $T_1$

Temperatura final deseada,  $T_2$

Tiempo para alcanzar la temperatura  $T_2$ ,  $t$

Densidad del gas,  $\rho_g$

Flujo volumétrico del gas,  $F_g$

Calor específico del gas,  $Cp_g$

Los kilowatts que se necesitan instalar para calentar el gas de la temperatura inicial,  $T_1$ , a la temperatura final,  $T_2$ ,

$$Q_i = \frac{F_g \rho_g C p_g (T_2 - T_1)}{Z} \times 1.2 \quad (6.1)$$

Donde

$Z$  = Factor de conversión igual a 3599865 para pasar de J/h a kW, o igual a 3412 para pasar de Btu/h a kW.

1.2 = Factor de seguridad por contingencia.

## Líquidos.

### Información básica.

Temperatura inicial del líquido,  $T_1$

Temperatura final deseada,  $T_2$

Tiempo para alcanzar la temperatura  $T_2$ ,  $t$

Volumen inicial del líquido en el recipiente,  $V_i$

Densidad del líquido,  $\rho_l$

Flujo volumétrico del líquido,  $F_l$

Calor específico del líquido,  $Cp_l$

Calor específico del recipiente,  $Cp_r$

Peso del recipiente vacío,  $m_r$

Área expuesta de la superficie del recipiente,  $A_s$

Calor de vaporización,  $H_f$  (si es aplicable)

Balance de energía para calentar el líquido de la temperatura inicial,  $T_1$ , a la temperatura final,  $T_2$ ,

$$Q_{li} = V_i \rho_l [Cp_l (T_2 - T_1)] \quad (6.2)$$

Balance de energía para calentar el recipiente de la temperatura inicial,  $T_1$ , a la temperatura final,  $T_2$ , (si es aplicable),

$$Q_r = m_r Cp_r (T_2 - T_1) \quad (6.3)$$

los kilowatts que se necesitan para el calentamiento inicial son

$$Q_{li} = \left( \frac{Q_{li} + Q_r}{Z \times t} + \frac{L_s}{2 \times 1000} \right) \times 1.2 \quad (6.4)$$

y los kilowatts para mantener la temperatura de operación

$$Q_{lo} = F_l \rho_l [Cp_l (T_2 - T_1)] \quad (6.5)$$

$$Q_{lo} = \left( \frac{Q_{lo}}{Z} + \frac{L_s}{1000} \right) \times 1.2 \quad (6.6)$$

donde  $L_s$ , es el término de las pérdidas de calor del recipiente y/o de las superficies expuestas al medio ambiente. Este valor, si es aplicable, se calcula multiplicando el área expuesta,  $A_s$ , por las pérdidas de calor obtenidas de las gráficas 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 o 7.5 del anexo III.

Si la temperatura final,  $T_2$ , excede la temperatura de ebullición del líquido, entonces hay formación de vapor y las ecuaciones (6.2) y (6.5), se modifican agregando el término de calor de vaporización a cada una de ellas, por lo que dichas ecuaciones quedan expresadas de la siguiente manera

$$Q_i = V_i \rho_l [C_{pl}(T_2 - T_1) + H_l] \quad (6.7)$$

$$Q_{lo} = F_l \rho_l [C_{pl}(T_2 - T_1) + H_l] \quad (6.8)$$

## Sólidos.

### Información básica.

Temperatura inicial del sólido,  $T_1$

Temperatura final deseada,  $T_2$

Tiempo para alcanzar la temperatura  $T_2$ ,  $t$

Masa inicial del sólido en el recipiente,  $m_s$

Flujo másico del sólido,  $W_s$

Calor específico del sólido,  $C_{ps}$

Calor específico del recipiente,  $C_{pr}$

Peso del recipiente vacío,  $m_r$

Área expuesta de la superficie del recipiente,  $A_s$

Área expuesta de la superficie del sólido,  $A_{sol}$

Calor de fusión,  $H_f$  (si es aplicable)

Balance de energía para calentar el sólido de la temperatura inicial,  $T_1$ , a la temperatura final,  $T_2$ ,

$$Q_{si} = m_s [C_{ps}(T_2 - T_1)] \quad (6.9)$$

Balance de energía para calentar el recipiente de la temperatura inicial,  $T_1$ , a la temperatura final,  $T_2$ , (sí es aplicable),

$$Q_r = m_r C_p (T_2 - T_1) \quad (6.10)$$

los kilowatts que se necesitan para el calentamiento inicial son

$$Q_{ir} = \left( \frac{Q_{sr} + Q_r}{Z \times t} + \frac{L_s}{2 \times 1000} \right) \times 1.2 \quad (6.11)$$

y los kilowatts para mantener la temperatura de operación

$$Q_{so} = W_s [C_p (T_2 - T_1)] \quad (6.12)$$

$$Q_{io} = \left( \frac{Q_{so}}{Z} + \frac{L_s}{1000} \right) \times 1.2 \quad (6.13)$$

Si la temperatura final alcanzada,  $T_2$ , es mayor que la temperatura de fusión del sólido, entonces a las ecuaciones (6.9) y (6.12), se les agrega el término del calor de fusión, quedándonos

$$Q_{si} = m_s [C_p (T_2 - T_1) + H_f] \quad (6.14)$$

$$Q_{so} = W_s [C_p (T_2 - T_1) + H_f] \quad (6.15)$$

## Tuberías.

### Información básica.

Temperatura que se desea mantener en la tubería,  $T_i$

Temperatura mínima que se espera en el medio ambiente,  $T_o$

Coefficiente de transferencia de calor del aire,  $h_o$

Coefficiente de transferencia de calor del fluido,  $h_i$

Radio interno de la tubería,  $r_i$

Conductividad térmica del material de la tubería,  $k_1$

Conductividad térmica del aislante,  $k_2$

Espesor del aislante,  $\epsilon$

Velocidad máxima del viento,  $V_e$

Utilizando la ley de Fourier para determinar el calor perdido por longitud de tubería

$$Q_i = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{2\pi r_i h_i} + \frac{1}{2\pi \sum \frac{\ln(r_o / r_i)}{k}} + \frac{1}{2\pi r_o h_o}} \times \%Seguridad \quad (6.16)$$

El % de seguridad se incluye si la velocidad del viento excede los 9 m/s (29 ft/s), por cada 2 m/s (6.5 ft/s) de exceso, hay que adicionar un 5% de seguridad, sin embargo, no se debe agregar más de un 15% de seguridad, sin importar que la velocidad del viento sea muy alta.

## 6.2 Especificación del sistema.

Después de calcular la cantidad de kilowatts que se necesitan instalar para suplir el calor perdido en la aplicación específica, hay que seleccionar el calentador más óptimo dentro de los posibles que pueden ser utilizados de acuerdo con los diagramas presentados al inicio del capítulo. Para llevar a cabo esta selección, necesitamos saber las características de cada uno de los calentadores eléctricos, tales como el intervalo de temperatura en el que pueden trabajar, sus dimensiones y los materiales con los que fueron fabricados.

### Cables de Calentamiento.

Si el material que se está calentando es una tubería, entonces se escoge preferentemente un cable de calentamiento a un calentador de circulación para realizar el trabajo. Esta selección se realiza tomando en cuenta el factor económico, pero en caso de que cualquier cable no pueda suplir la cantidad de calor perdido por el sistema, entonces se instalará un calentador de circulación. Para seleccionar el tipo de cable que debe ser utilizado, hay que realizar un análisis entre los parámetros de los diferentes tipos de cables tomando en cuenta los siguientes puntos.

- a) Disponibilidad del cable, la cual está basada en la temperatura que puede mantener el cable y en la temperatura máxima a la que puede estar expuesto (ver tabla 6.2).

**Tabla 6.2** Disponibilidad del cable.

Aplicación	Selección del Cable	Temp. que puede mantener, K (°F)	Temp. máx. de exposición K (°F)
Tuberías de baja temperatura	Cable de autorregulación contra el congelamiento	339 (150)	358 (185)
	Cable de autorregulación de baja temperatura	339 (150)	358 (185)
	Cable de autorregulación de mediana temperatura	394 (250)	464 (375)
	Cable de potencia constante	Hasta 533 (500)	Hasta 533 (500)
Tuberías de alta temperatura	Cable con aislante mineral	Hasta 1228 (1750)	Hasta 1228 (1750)

b) Seleccionar la envolvente con el material apropiado.

**Tabla 6.3** Material de la envolvente.

Material de la envolvente	Cable de autorregulación	Cable de potencia constante	Cable con aislante mineral
<b>Básico</b>			
Caucho Termoplástico (TPR)	X		
PVC		X	
Fluoropolímero Termoplástico		X	
Cobre			X
Incoloy			X
<b>Opcional</b>			
Trenzas de Cobre estañado	X	X	
Envolvente de TPR	X		
Envolvente de Fluoropolímero	X	X	
Revestimiento de polietileno			X

c) Calor de salida. Escoger cualquier cable de calentamiento que tenga un calor de salida igual o mayor que el calor perdido  $Q/L$  (tabla 6.4), si se selecciona un cable de autorregulación, hay que consultar las gráficas 7.6, 7.7 o 7.8 del anexo III. Si el calor perdido por longitud de tubería excede el calor de salida de cualquiera de los cables de calentamiento, se puede realizar cualquiera de las siguientes opciones:

Escoger un tipo diferente de calentador

Usar dos o más líneas paralelas sobre la tubería

**Tabla 6.4** Calor de salida.

Selección del Cable	Temp. máx. de servicio K (°F)	Calor de Salida (Watts/pie)
Cable de autorregulación contra el congelamiento	358 (185)	3,5,8
Cable de autorregulación de baja temperatura	358 (185)	3,5,8,10
Cable de autorregulación de temperatura media	464 (375)	3,5,8,10,15,20
Cable de potencia constante	366 (200)	3,5,7
	473 (392)	4,8,10,12
	478 (400)	3,5,8,12
	533 (500)	4,8,12
Cable con aislante mineral	522 (480)	Con envoltente de cobre hasta 40
	1228 (1750)	Con envoltente de Incoloy hasta 200

Para determinar la longitud de cable que se necesita, hay que tomar en cuenta los accesorios que se encuentran instalados en la tubería, por lo tanto, para:

Tubería recta: La cantidad de cable es igual a la longitud de la tubería. Si se utilizan líneas paralelas de cables, la cantidad es igual al número de líneas por la longitud de la tubería.

Bridas: Por cada brida, proveer una cantidad de cable extra igual a dos veces el diámetro de la brida.

Válvulas: La tabla 6.5 nos proporciona la longitud equivalente.

Otras variaciones. Se puede dar una cantidad extra de cable por las diferencias que puedan existir entre los dibujos de las tuberías y las instalaciones en campo.

1% para tuberías con un diámetro de hasta 1"

2% para tuberías con un diámetro mayor a 1" pero menor a 4"

3-5% para tuberías con un diámetro mayor a 4"

Tabla 6.5 Longitud equivalente de las válvulas.

Tamaño de la tubería (pulgadas)	Válvulas de mariposa (pies)	Válvulas de globo o de compuerta (pies)
½, ¾, 1, 1½	1	1
2, 2½, 3	1	2
4	2	3
5	2	4
6	2	5
8	3	5
10	3	6
12	4	6
14	4	8
16	5	8
18, 20, 24	5	10

#### Calentadores de tira.

La tabla 7.4. del anexo II nos muestra algunos flujos térmicos típicos para algunas aplicaciones específicas y los materiales con los que pueden ser construidos los envolventes de los elementos. La selección del material de la envolvente está en función de la temperatura máxima que puede soportar dicha envolvente (tabla 6.1) y de las propiedades químicas del material que está siendo calentado.

Características comerciales de los diferentes tipos de calentadores de tira.

a) Calentadores de tira con una terminal en cada extremo.

Ancho del elemento: 1 ½ pulgada

Longitud máxima del elemento: Hasta 42.5 pulgadas

Material de la envolvente: Fierro resistente a la corrosión y acero cromado

Calor que genera: 150 a 1500 Watts

b) Calentadores de tira con dos terminales en uno de sus extremos.

Ancho del elemento: 1 ½ y 1 pulgada

Longitud máxima del elemento: Hasta 72 pulgadas

Material de la envolvente: Fierro resistente a la corrosión, acero cromado y monel

Calor que genera: 125 a 3000 Watts

c) Calentadores de tira con dos terminales centradas.

Ancho del elemento: 1 ½ pulgada

Longitud máxima del elemento: Hasta 24 pulgadas

Material de la envolvente: Acero cromado

Calor que genera: 350 a 1000 Watts

d) Calentadores de tira con tres terminales.

Ancho del elemento: 1 ½ pulgada

Longitud máxima del elemento: Hasta 72 pulgadas

Material de la envolvente: Acero cromado

Calor que genera: 400 a 3000 Watts

e) Calentadores de tira con aletas.

Ancho del elemento: 1 ½ pulgada (con aletas 2 pulgadas)

Longitud máxima del elemento: Hasta 48 pulgadas

Material de la envolvente: Fierro resistente a la corrosión y acero cromado

Calor que genera: 250 a 4150 Watts

Temperaturas de trabajo máximas: de 225°F a 565°F

Sí estamos manejando sólidos o líquidos, utilizamos la temperatura máxima que puede soportar la envolvente y la temperatura que se desea alcanzar en el material para conocer el flujo térmico,  $q_w$ , de la gráfica 7.9 del anexo III. Dividiendo el calor perdido,  $Q_i$ , entre el flujo térmico,  $q_w$ , obtenemos el área de transferencia total del calentador.

$$A = \frac{Q_i}{q_w} \quad (6.17)$$

En las aplicaciones con abrazaderas la longitud del calentador,  $L$ , siempre está limitada por el tamaño del recipiente. Para una longitud del calentador menor a  $30\frac{1}{2}$ ", la sección fría,  $C$ , tiene un valor de 4", y para una longitud igual o mayor a  $30\frac{1}{2}$ ",  $C$  es igual a 5". Los calentadores de tira con un ancho de  $1\frac{1}{2}$ " tienen 3.45 pulgadas cuadradas de superficie por pulgada lineal, y los calentadores que presentan un ancho de 1" tienen 2.31 pulgadas cuadradas de superficie por pulgada lineal. El número de tiras que se necesitan instalar para suplir el calor perdido se puede determinar por

$$\# \text{ tiras} = \frac{A}{(L-C) \times \frac{\text{pulgada cuadrada superficie}}{\text{pulgada lineal}}} \quad (6.18)$$

Al igual que para los líquidos y sólidos, la longitud del calentador para el calentamiento de gases está limitada por el tamaño del recipiente a través del cual se hará pasar el gas. La velocidad del gas en el interior del ducto se define por

$$V_e = \frac{F}{A} \quad (6.19)$$

donde  $F$  es el flujo volumétrico del gas, y  $A$ , el área transversal del ducto. Con la velocidad obtenida y la temperatura que se quiere alcanzar para el gas, leemos de la gráfica 7.10 o de la gráfica 7.11 (si el calentador tiene aletas) el flujo térmico permitido. Con este dato y conociendo el tamaño del recipiente podemos seleccionar un calentador que tenga una dimensión y un flujo térmico semejantes a estos resultados. Para conocer el número de tiras con o sin aletas que se requieren, tenemos

$$\# \text{ tiras c/s aletas} = \frac{Q_i}{\text{Watts de cada elemento}} \quad (6.20)$$

### Calentadores tubulares.

Los elementos tubulares que tienen una sección transversal redonda son los más utilizados para el diseño de los calentadores eléctricos que tienen mayor aplicación en la industria, tales como los calentadores tubulares, de circulación y de inmersión. Los elementos tubulares pueden ser doblados para formar diferentes geometrías, el radio interno mínimo que debe tener el elemento se muestra en la siguiente tabla, donde también se presentan los diámetros que se utilizan con mayor frecuencia en el diseño de los calentadores eléctricos tubulares.

Material de la envolvente	Grado de doblez	Radio interno mínimo (pulgadas)					
		.475"	.430"	.375"	.315"	.260"	.246"
Cobre, acero o aleación	90° o 180°	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	3/4

Como ya hemos visto, los calentadores tubulares se pueden utilizar para calentar gases, líquidos o sólidos, en el anexo II presentamos la tabla 7.5, la cual nos da información sobre los flujos térmicos típicos para determinadas aplicaciones y los materiales que pueden ser utilizados para la fabricación de la envolvente.

**Tabla 6.6** Características de los calentadores tubulares.

Diámetro (in.)	Longitud máxima del elemento (in.)	Calor que genera (Watts)
0.246	Hasta 112	165 a 2365
	Hasta 63 con aletas	500 a 2675
0.260	Hasta 112	175 a 2500
0.315	Hasta 112	275 a 3050
	Hasta 63 con aletas	500 a 3500
0.430	Hasta 112	400 a 4500
0.475	Hasta 160	450 a 7500
	Hasta 63 con aletas	725 a 5000

Para sustancias sólidas y líquidas, el número de elementos tubulares que se requieren para el calentador depende del área de transferencia total  $A$ , la cual se calcula con la ecuación (6.17). El flujo térmico  $q_w$ , se obtiene con la gráfica 7.12 del anexo III, la cual está basada en el promedio entre la temperatura del material y la temperatura máxima de la envolvente. Con el valor de  $A$ , calculamos la longitud total de calentamiento para un diámetro dado de la siguiente manera

$$L_t = \frac{A}{\pi D} \quad (6.21)$$

Como los elementos tubulares generalmente se utilizan para reemplazar los tubos en los equipos de transferencia de calor, entonces su longitud siempre está limitada por el tamaño del equipo. Por lo tanto, el número de elementos que se necesitan instalar son

$$\# \text{ elementos} = \frac{L_t}{(L - C)} \quad (6.22)$$

donde  $L$  es la longitud de cada uno de los elementos y  $C$  es la longitud de la sección fría, la cual tiene un valor de 6.5. El cálculo del número de elementos cuando se está calentando un gas, es prácticamente igual al cálculo que se efectuó con los calentadores de tira, con la diferencia que para conocer el flujo térmico para los calentadores tubulares se utilizan las gráficas 7.13 (para elementos tubulares) y 7.14 (para elementos tubulares con aletas).

### **Calentadores de inmersión.**

Los calentadores de inmersión son calentadores con elementos tubulares doblados y arreglados con una cierta geometría, existen principalmente dos tipos de calentadores de inmersión, los que tienen los elementos de calentamiento en un collarín roscado y los que tienen los elementos de calentamiento soportados por bridas.

Para el primer tipo de calentador mencionado, el material tanto de su envolvente como del collarín se pueden consultar en la tabla 7.6 del anexo II, asimismo, en la tabla 7.7 del mismo anexo, podemos ver los materiales disponibles para la envolvente y para la brida del segundo tipo de calentador de inmersión.

La secuencia para calcular el número total de elementos de inmersión es similar a la secuencia de los calentadores tubulares, variando solamente en la ecuación (6.22), ya que ésta se define por

$$\# \text{ elementos} = \frac{L}{2 \times L} \quad (6.23)$$

De acuerdo al número total de elementos calculados, las tablas 6.7 y 6.8 nos proporcionan información de la cantidad de elementos que puede tener el collarín roscado o la brida, dependiendo del tamaño nominal que presenten éstas. Estas tablas también nos muestran la longitud máxima y el calor que generan los elementos de calentamiento de inmersión de acuerdo a la sustancia que está siendo calentada. Todos los datos reportados en dichas tablas están basados en equipos de calentamiento eléctrico estándares.

**Tabla 6.7** Características de los calentadores con collarín roscado.

Material que será calentado	Diámetro del elemento	Longitud máx. del elemento	Número de elementos	Tamaño del collarín	Calor que genera (kW)
Agua limpia	0.315", 0.375" y 0.475"	54 pulg.	1, 2 y 3	1", 1 1/4", 2" y 2 1/2"	0.75 a 18
Agua de proceso	0.315", 0.475"	54 pulg.	1, 2 y 3	1", 2" y 2 1/2"	0.75 a 18
Solución acuosa	0.475"	54 pulg.	1, 2 y 3	2" y 2 1/2"	2 a 18
Aceite de viscosidad baja	0.315", 0.475"	48 pulg.	1, 2 y 3	1", 1 1/4", 2" y 2 1/2"	0.25 a 9
Aceite de viscosidad media	0.475"	68 pulg.	2 y 3	2" y 2 1/2"	2 a 9
Aceite de viscosidad alta	0.475"	48 pulg.	2 y 3	2" y 2 1/2"	0.5 a 2.475
Tanques pequeños	0.315"	26 pulg.	1	1", 1 1/4"	0.35 a 5

**Tabla 6.8** Características de los calentadores con bridas.

Material que será calentado	Diám. del elemento	Longitud máx. del elemento	Número de elementos	Tamaño de la brida	Calor que genera (kW)
Agua limpia	0.475"	79 pulg.	3 y 6	3" y 5"	6 a 60
Agua de proceso	0.475"	79 pulg.	3, 6 y 12	3",5" y 6"	6 a 72
Solución acuosa	0.475"	79 pulg.	3, 6 y 12	3",5" y 6"	6 a 72
Solución ligeramente corrosiva	0.475"	79 pulg.	3, 6 y 12	3",5" y 6"	3 a 36
Solución de corrosión más severa	0.475"	79 pulg.	3, 6, 12 y 18	3",5",6",8"	3 a 50
Solución severamente corrosiva	0.475"	49 pulg.	3, 6 y 12	3",5" y 6"	2 a 24
Aceite de viscosidad baja	0.475"	79 pulg.	3, 6, 12 y 18	3",5",6",8"	3 a 80
Aceite de viscosidad media	0.475"	69 pulg.	3, 6 y 12	3",5" y 6"	3 a 24
Aceite de viscosidad alta	0.475"	79 pulg.	3 y 6	3" y 5"	1.2 a 8.4

### Calentadores de circulación.

El calentador de circulación es un calentador de inmersión con todos los accesorios que lleva un cambiador de calor de coraza y tubos, y al igual que los calentadores de inmersión con bridas, este tipo de calentador solo presenta un diámetro comercial. La tabla 7.8 del anexo II nos da los materiales tanto para la envolvente como para la coraza para diferentes aplicaciones. El cálculo del número de elementos totales de calentamiento se realiza de la misma manera que la de un calentador de inmersión.

**Tabla 6.9** Características de los calentadores de circulación.

Material que será calentado	Diám. del elemento	Número de elementos	Calor que genera (kW)
Agua limpia	0.475"	2, 3 y 6	3 a 60
Soluciones acuosas y ligeramente corrosivas	0.475"	3 y 6	3 a 50
Aceite	0.475"	2, 3 y 6	1.5 a 30
Vapor, aire & gas	0.475"	2, 3 y 6	1 a 30
Líquidos y aceites corrosivos, gas a alta temperatura	0.475"	3 y 6	2 a 30

**Calentadores de Banda.**

Los calentadores de banda generalmente se utilizan para reemplazar equipos que ya están en operación, por lo tanto, tenemos que determinar el diámetro externo de la boquilla que va a ser calentada, esto nos permitirá conocer el diámetro interno del calentador. Después, hay que medir el ancho del calentador para obtener las temperaturas máximas de la envolvente y del cilindro de la tabla 6.10.

**Tabla 6.10** Características de los calentadores de banda.

Diámetro interno (in)	Ancho (in)	Calentador	Temp. máx. del cilindro	Temp. máx. de la envolvente	Calor que genera (W)
1 a 3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 a 2	MB 1 pieza	750 °F	900 °F	85 a 900
3 a 12	2	HBT	900 °F	1200 °F	675 a 2000
4 a 11 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> a 2	MB 2 piezas	750 °F	900 °F	550 a 1650
6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> a 11 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	DBW	800 °F	1200 °F	1525 a 3250
5 a 20	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	HB	800 °F	1200 °F	400 a 3000
5 a 12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	DB	800 °F	1200 °F	750 a 2100
1 a 4	<sup>7</sup> / <sub>8</sub> a 6	HBA	1000 °F	1500 °F	200 a 800
1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> a 3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 a 7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	HBZ	1000 °F	1600 °F	150 a 800

El flujo térmico lo podemos determinar con la siguiente ecuación

$$q_w = \frac{Q_r}{A} \quad (6.24)$$

donde A, es el área superficial de contacto y está definida por

$$A = (\pi \times D \times W) - C \quad (6.25)$$

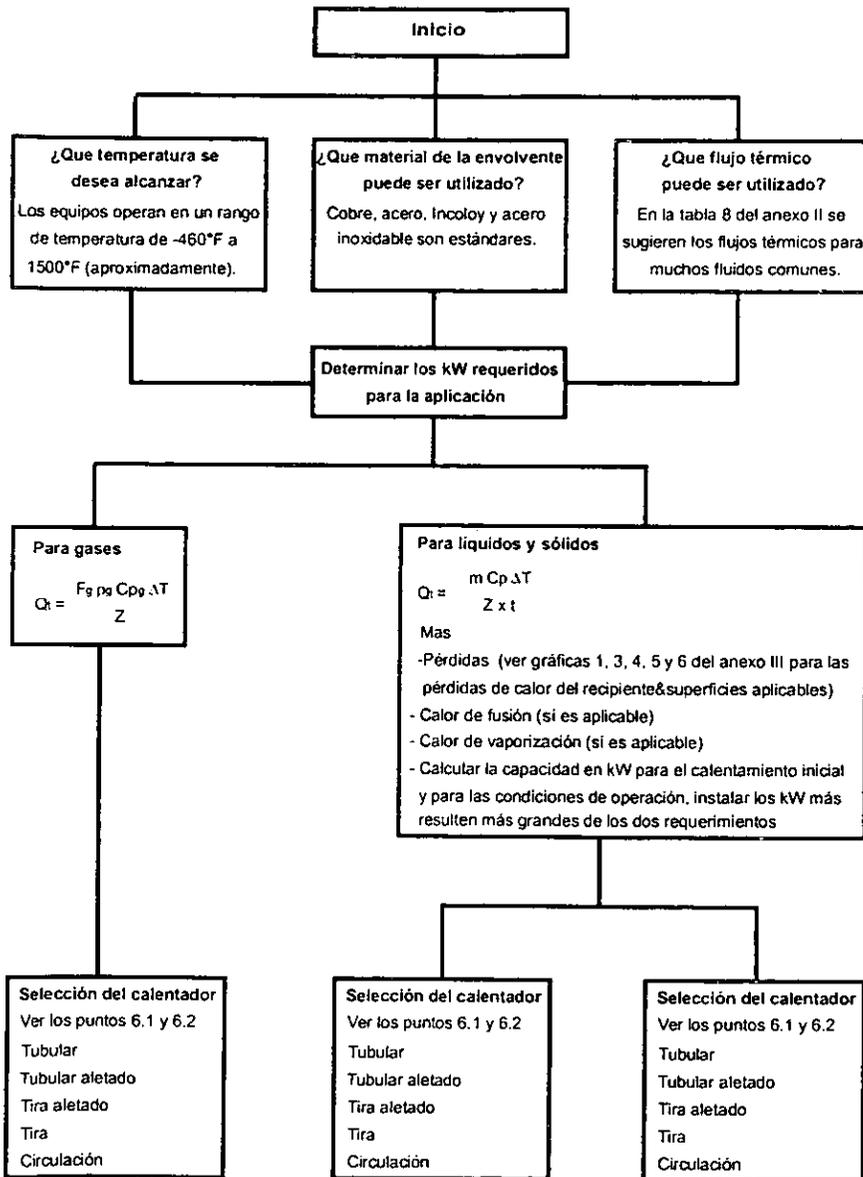
donde D es el diámetro interno, W es el ancho, y C es la sección fría del calentador. El valor de la longitud de la sección fría, C, para los elementos de calentamiento se puede obtener de la tabla 6.11.

**Tabla 6.11** Sección fría de los calentadores de banda.

Tipo de calentador	Sección fría (C) en pulgadas cuadradas
MB de dos piezas	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " x ancho de la banda
MB de una pieza	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " x ancho de la banda
HB	4" x ancho de la banda
HBT	3" x ancho de la banda
HBZ	1" x ancho de la banda

Verificar en la gráfica 16 del anexo III que el flujo térmico obtenido no exceda el máximo permitido.

La secuencia general de cálculo para la especificación de los calentadores eléctricos industriales se puede resumir de manera global en el siguiente diagrama de flujo.



### 6.3 Aplicación.

Una planta química tiene un tanque de acero cilíndrico en posición horizontal con tapas planas, el cual contiene agua limpia y está aislado con dos pulgadas de fibra de vidrio. Las características del tanque son: 4.5 pies de diámetro, 14 pies de longitud, pesa 350 libras vacío y contiene inicialmente 1400 galones de agua. Inicialmente, el tanque y su contenido serán calentados de 70°F a 180°F en 2 horas. Después, 350 galones por hora de agua que fluyen a través del tanque deben ser calentados de 70°F a 180°F. Seleccionar el calentador eléctrico más adecuado para ésta aplicación.

#### Datos

Temperatura inicial del líquido,  $T_1 = 70^\circ\text{F}$  (294 K)

Temperatura final deseada,  $T_2 = 180^\circ\text{F}$  (356 K)

Tiempo para alcanzar la temperatura  $T_2$ ,  $t = 2$  horas

Volumen inicial del líquido en el recipiente,  $V_i = 187 \text{ ft}^3$  (5.3  $\text{m}^3$ )

Densidad del líquido,  $\rho_l = 62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$  (1000  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Flujo volumétrico del líquido,  $F_l = 46.8 \text{ ft}^3/\text{h}$  (1.3  $\text{m}^3/\text{h}$ )

Calor específico del líquido,  $C_{p_l} = 1 \text{ Btu}/\text{lb}_m^\circ\text{F}$  (4.184  $\text{kJ}/\text{kg K}$ )

Calor específico del recipiente,  $C_{p_r} = 0.12 \text{ Btu}/\text{lb}_m^\circ\text{F}$  (0.5  $\text{kJ}/\text{kg K}$ )

Peso del recipiente vacío,  $m_r = 350 \text{ lb}_m$  (159 kg)

Área expuesta de la superficie del recipiente,  $A_s = \pi D L + 2\pi r^2 = 230 \text{ ft}^2$  (21.3  $\text{m}^2$ )

#### Calor perdido.

Capacidad de calentamiento inicial:

Energía para calentar la carga inicial (ecuación 6.2)

$$Q_i = 187 \text{ ft}^3 \times 62.4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (180 - 70)^\circ\text{F} = 1283568 \text{ Btu} \quad (1.35 \times 10^9 \text{ J})$$

Energía para calentar el tanque (ecuación 6.3)

$$Q_r = 350 \text{ lb}_m \times 0.12 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (180 - 70)^\circ\text{F} = 4620 \text{ Btu} \quad (4.87 \times 10^6 \text{ J})$$

De la gráfica 3 del anexo III, el calor perdido del área superficial expuesta del tanque es 10 Watts/ft<sup>2</sup>

$$L_s = 230 \text{ ft}^2 \times 10 \frac{\text{Watts}}{\text{ft}^2} = 2300 \text{ Watts}$$

los kilowatts para el calentamiento inicial (ecuación 6.4)

$$Q_{ti} = \left( \frac{1283568 + 4620}{3412 \times 2} + \frac{2300}{2 \times 1000} \right) \times 1.2 = 228 \text{ kW}$$

Requerimientos de operación (ecuaciones 6.5 y 6.6):

$$Q_{to} = 46.8 \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \times 62.4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times (180 - 70)^\circ\text{F} = 321235 \text{ Btu} \quad (3.38 \times 10^8 \text{ J})$$

$$Q_{to} = \left( \frac{321235}{3412} + \frac{2300}{1000} \right) \times 1.2 = 116 \text{ kW}$$

Como los requerimientos para el calentamiento inicial son mayores que para los de operación, entonces debemos instalar 228 kilowatts.

### **Especificación del sistema.**

Recurriendo a los diagramas presentados al inicio de este capítulo, observamos que para el calentamiento de un líquido se pueden utilizar cuatro tipos de calentadores eléctricos de calentamiento directo y uno de calentamiento indirecto.

- Calentador de inmersión con bridas
- Calentador de inmersión con collarín roscado
- Calentador de circulación
- Calentador tubular
- Calentador de tira con abrazaderas

Sí observamos las tablas 6.6 y 6.7, nos damos cuenta que los elementos tubulares y los elementos de inmersión con collarín roscado presentan un calor de salida máximo de 7.5 y 18 kilowatts respectivamente. Al comparar estos valores con la cantidad de energía que se requiere para llevar a cabo la aplicación, podemos

estimar que se ocuparía un número elevado de estos elementos para generar los kilowatts que se necesitan. En la misma situación de éstos dos tipos de calentadores eléctricos también se encuentran los calentadores de tira, los cuales presentan un calor de salida máximo de 3 kW. Por este motivo, se descarta la posibilidad de emplear cualquiera de los calentadores eléctricos mencionados. Por otra parte, los calentadores de circulación y los calentadores de inmersión con bridas presentan un calor de salida de 60 kW como máximo para este tipo de aplicación, esta característica los hace más viables para ser utilizados en este problema en específico, pero de los dos tipos de calentadores, el más viable económicamente es el calentador de inmersión, ya que al estar instalado en el interior del tanque, no necesita de los accesorios y de la coraza que utiliza el calentador de circulación, el cual se instalaría en el costado del tanque. Al seleccionar el calentador de inmersión con bridas, el diámetro del elemento se fija inmediatamente en 0.475 pulgadas, ya que es el único diámetro comercial disponible para este tipo de calentador eléctrico. Con las ecuaciones (6.17) y (6.21) podemos determinar el área de transferencia total y la longitud total de calentamiento respectivamente.

$$A = \frac{228000 \text{ Watts}}{45 \frac{\text{Watts}}{\text{in}^2}} = 5066.6 \text{ in}^2 \text{ (3.26 m}^2\text{)}$$

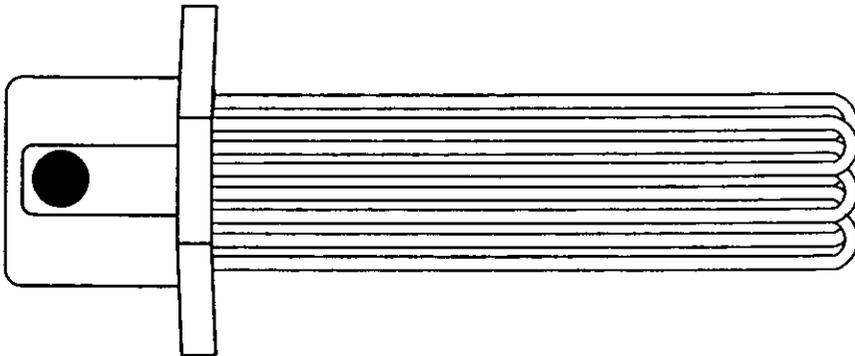
$$L_1 = \frac{5066.6 \text{ in}^2}{\pi \times 0.475 \text{ in}} = 3395 \text{ in (86.23 m)}$$

Basándonos en las dimensiones del tanque, podemos seleccionar la longitud máxima del elemento, por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (6.23), el número de elementos que se necesitan instalar es

$$\# \text{ elementos} = \frac{3395 \text{ in}}{2 \times 79 \text{ in}} = 22$$

Si escogemos en la tabla 6.8 un tamaño nominal de la brida de 5 pulgadas con sus 6 elementos de calentamiento, entonces, necesitaríamos 2 calentadores de inmersión instalados en cada tapa con un calor de salida de 60 kW cada uno.

La selección del material de la envolvente del elemento de calentamiento se hace en función de la temperatura máxima que puede soportar un determinado material y de las propiedades químicas del líquido que se está calentando. Para este caso, si consultamos la tabla 6.1 de temperaturas máximas, podemos ver que cualquier material puede ser empleado para la construcción de la envolvente, esto es porque la temperatura de operación (180°F) es inferior a la temperatura máxima de cualquier material. Por otra parte, debido a que el agua no es un fluido corrosivo, entonces, podemos escoger al Cobre como material para la construcción de la envolvente del elemento de calentamiento, y al Acero al carbono SA-105 para la construcción de la brida.



**Fig. 6.1** Calentador eléctrico con 6 elementos de inmersión en la brida.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES, ANEXOS**

### **Y BIBLIOGRAFIA**

## CONCLUSIONES

A pesar de que el calentamiento eléctrico puede ser aplicado en casi todos los lugares en donde se requiere energía térmica sin ser restringido por consideraciones ambientales, su uso en el ámbito industrial todavía no se ha propagado con gran eficacia, ya que dentro de las limitaciones que presentan estos equipos está el alto costo de la energía eléctrica que se utiliza. Por este motivo, su uso generalmente se restringe a procesos que operan por lotes y/o a procesos que utilicen flujos relativamente bajos, en donde estos calentadores son muy adecuados porque operan más efectivamente que la transferencia de calor por un fluido.

Existen otras ventajas que pueden derivarse del tamaño compacto de los elementos de calentamiento de los calentadores eléctricos, tales como su alta eficiencia eléctrica, que es el porcentaje de energía eléctrica convertida en calor útil, la facilidad con la que generan altas temperaturas, la eliminación de riesgos de combustión, y su fácil aplicación y adaptación para control y regulación automática. El tamaño compacto de los calentadores eléctricos es una característica muy importante cuando estamos analizando los factores económicos, porque al ocupar un espacio pequeño, los costos por el uso de suelo se reducen significativamente.

Debido a la gran cantidad y variedad de calentadores eléctricos que existen en el mercado, la secuencia general de cálculo que se obtuvo durante el desarrollo de la tesis para especificar a los calentadores eléctricos, fue orientada solamente al calentamiento eléctrico industrial con resistencias. Al introducir ésta limitante, el número de equipos se redujo considerablemente, y por consiguiente, la secuencia de cálculo se simplificó, permitiéndonos realizar una buena integración de la información aportada por los proveedores, por lo que el objetivo de la tesis se alcanzó satisfactoriamente.

# **ANEXO I**

## **NOMENCLATURA Y**

## **FACTORES DE CONVERSION**

## NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades	
		SI	Inglés
$A$	Área de sección transversal, área superficial	$m^2$	$ft^2$
$C$	Sección fría	$m$	$ft$
$C_p$	Calor específico a presión constante	$J/kg\ K$	$Btu/lb_m\ ^\circ R$
$D$	Diámetro	$m$	$ft$
$E$	Poder emisivo	$W/m^2$	$Btu/h\ ft^2$
$F$	Flujo volumétrico	$m^3/s$	$ft^3/s$
$F$	Fuerza	$N$	$lb_f$
$H_f$	Entalpía de fusión	$J/kg$	$Btu/lb_m$
$H_v$	Entalpía de vaporización	$J/kg$	$Btu/lb_m$
$h$	Coefficiente de transferencia de calor	$W/m^2K$	$Btu/h\ ft^2\ ^\circ R$
$I$	Corriente eléctrica	$A$	$A$
$k$	Conductividad térmica	$W/m\ K$	$Btu/h\ ft\ ^\circ R$
$L$	Longitud	$m$	$ft$
$L_s$	Pérdidas de calor	$W/m^2$	$W/ft^2$
$m$	masa	$kg$	$lb_m$
$P$	Potencia	$W$	$Btu/h$
$p$	presión	$N/m^2$	$lb_f/ft^2$
$Q$	Calor	$J$	$Btu$
$Q_t$	Transferencia de calor	$W$	$Btu/h$
$q$	Flux de calor	$W/m^2$	$Btu/h\ ft^2$
$q_i$	Generación de calor interna	$W/m^3$	$Btu/h\ ft^3$
$R$	Resistencia eléctrica	$\Omega$	$\Omega$
$R$	Radio	$m$	$ft$
$R_{th}$	Resistencia térmica	$K/W$	$^\circ R\ h/Btu$
$r$	Radio	$m$	$ft$
$r$	Coordenada radial	$m$	$ft$
$T$	Temperatura	$K$	$^\circ R$
$t$	Tiempo	$S$	$S$

Símbolo	Definición	Unidades	
		SI	Inglés
$U$	Coefficiente de transferencia de calor total	$W/m^2K$	$Btu/h\ ft^2\ ^\circ R$
$V_e$	Velocidad	$m/s$	$ft/s$
$V$	Volumen	$m^3$	$ft^3$
$V$	Voltaje	$V$	$V$
$W$	Ancho	$m$	$ft$
$W$	Flujo másico	$kg/s$	$lb_m/s$
$x$	Coordenada rectangular	$m$	$ft$
$y$	Coordenada rectangular	$m$	$ft$
$z$	Coordenada rectangular	$m$	$ft$
<b>Letras griegas</b>			
$\alpha$	Difusividad térmica	$m^2/s$	$ft^2/s$
$\beta$	Coefficiente de temperatura		
$\Delta$	Diferencia		
$\epsilon$	Emisividad		
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$	$lb_m/ft^3$
$\rho$	Resistividad	$\Omega\text{-}m$	$\Omega\text{-}ft$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2K^4$	$Btu/h\ ft^2\ ^\circ R^4$
<b>Subíndices</b>			
$b$	Cuerpo negro		
$g$	Gas		
$i$	Interior, entrada, inicio		
$l$	Líquido		
$o$	Exterior, salida, operación, centro		
$r$	Recipiente		
$s$	Sólido		
$sol$	Sólido		
$t$	Total, térmico		
$w$	Pared o superficie		

## FACTORES DE CONVERSION

Aceleración	1 m/s <sup>2</sup>	= 3.2808 ft/s <sup>2</sup>
Area	1 m <sup>2</sup>	= 10.7636 ft <sup>2</sup>
		= 1550 in. <sup>2</sup>
Calor específico	1 kJ/kg K	= 0.2388 Btu/lb <sub>m</sub> °R
Calor latente, energía específica	1 kJ/kg	= 0.4299 Btu/lb <sub>m</sub>
Coefficiente de transferencia de calor	1 W/m <sup>2</sup> K	= 0.1761 Btu/h ft <sup>2</sup> °R
Conductividad térmica	1 W/m K	= 0.5778 Btu/h ft °R
Densidad	1 kg/m <sup>3</sup>	= 0.0624 lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>
		= 3.6127 x 10 <sup>-5</sup> lb <sub>m</sub> /in. <sup>3</sup>
Energía, trabajo, calor	1055.06 J	= 1 Btu
	1.35582 J	= 1 ft lb <sub>f</sub>
	10 <sup>-7</sup> J	= 1 erg
	4.1868 J	= 1 cal
	252 cal	= 1 Btu
	1 kWh	= 3412 Btu
Flujo másico	1 kg/s	= 2.2046 lb <sub>m</sub> /s
		= 7937 lb <sub>m</sub> /h
Flux de calor	1 W/m <sup>2</sup>	= 0.3171 Btu/h ft <sup>2</sup>
Fuerza	4.4482 N	= 1 lb <sub>f</sub>
	10 <sup>-5</sup> N	= 1 dina
Generación interna de calor	1 W/m <sup>3</sup>	= 0.9665 Btu/h ft <sup>3</sup>
Longitud	1 m	= 3.2808 ft
	2.54 cm	= 1 in.
	5280 ft	= 1 mi
	1 km	= 0.6214 mi
Masa	1 kg	= 2.2046 lb <sub>m</sub>

## FACTORES DE CONVERSIÓN (CONTINUACION)

Transferencia de calor, Potencia	1 W	= 3.4121 Btu/h
	745.7 W	= 1 hp
	1.3558 W	= 1 lb <sub>f</sub> ft/s
Presión	1 kN/m <sup>2</sup>	= 1 kPa = 20.8855 lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup>
	101.325 kPa	= 1 atm = 14.7 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
Temperatura	T(K)	= T(°C)+273.15 = T(°R)/1.8 = [T(°F)+460] /1.8
	T(°F)	= 1.8T(°C)+32
Diferencia de temperatura	ΔT(K)	= ΔT(°C) = ΔT(°F)/1.8 = ΔT(°R)/1.8
Velocidad	1 m/s	= 3.2808 ft/s
		= 11,811 ft/h
		= 2.2369 mi/h
		= 3.6000 km/h
Viscosidad cinemática	1 m <sup>2</sup> /s	= 10,000 stoke
		= 10.7639 ft <sup>2</sup> /s
		= 38,750 ft <sup>2</sup> /h
Viscosidad dinámica	1 kg/m s	= 10 poise
		= 0.6720 lb <sub>m</sub> /ft s
		= 2419 lb <sub>m</sub> /ft h
Volumen	1 m <sup>3</sup>	= 1000 L
		= 35.3134 ft <sup>3</sup>
		= 61,022 in. <sup>3</sup>
		= 264.17 gal

## **ANEXO II**

## **TABLAS**

**Tabla 7.1** Flujo térmico permitido para algunas sustancias.

Material que será calentado	Temperatura máxima de operación, K (°F)		Flujo térmico permitido (W/in <sup>2</sup> )
Aceite mineral	367	200	20
	478	400	16
Aceite para máquina, SAE-30	395	250	18
Aceite vegetal	478	400	30
Agua (limpieza)	333	140	80-90
Agua (proceso)	373	212	50
Alcali	373	212	40
Amoniaco líquido	283	50	25
Asfalto, brea, componentes pesados, etc.	367	200	10
	422	300	8
	478	400	7
	533	500	6
Baño de aceite	589	600	20
	478	400	16
Baño de sal fundida	700 a 783	800 a 950	25-30
Cianuro de sodio	333	140	40
Combustóleo C para barcos	344	160	10
Dowtherm A	672	750	22
		Vaporización	750
Dowtherm J líquido	575	575	22
Estaño fundido	589	600	20
Etilenglicol	422	300	30
Freón	422	300	3
Gasolina, keroseno	272	30	20
Melazas	311	100	4-5
Precalentamiento de combustóleo	356	180	9

**Tabla 7.1** Flujo térmico permitido para algunas sustancias (continuación).

Material que será calentado	Temperatura máxima de operación, K (°F)		Flujo térmico permitido (W/in. <sup>2</sup> )	
	K	°F		
Recipiente de metal fundido	533 a 756	500 a 900	20-27	
Soluciones ácidas	356	180	40	
Sosa cáustica	2%	372	210	45
	10%	372	210	25
	75%	356	180	25
Terminoles y aceites para transferencia de calor	533	500	22	
Terminol 66	617	650	22	
Tricloroetileno	339	150	20	

**Tabla 7.2** Composición nominal en % de aleaciones de Níquel.

Aleación	Ni	Cu	Fe	Cr	Mo	Al	Si	Mn	W	C	S	Ti
Níquel 270	99.98*											
	min											
Níquel 200	99.4*	0.1	0.15				0.05	0.25		0.05	0.005	
Duraníquel 301	93.7*	0.05	0.35			4.4	0.5	0.3		0.17	0.005	
80 Ni	77.0			19.5			1.5	2.5		0.25		
	min						max	max		max		
Monel 400	67	30	1.4				0.1	1.0		0.15	0.01	
Monel K-500	66	29	0.9			2.7	0.5	0.7		0.15	0.005	
Hastelloy C	51		6	17	19		0.1	1	5			
Incoloy 825	42	2.2	30	21.5	3	0.1	0.25	0.5		0.03	0.015	0.9
Inconel 600	76*	0.25	8	15.5			0.25	0.5		0.08	0.007	
Inconel 718	70*	0.50	5.9	15.5		0.7	0.7	1		0.08	0.01	2.3
	min											

\*Incluyendo cobalto

Tabla 7.3 Guía de corrosión para algunos materiales.

Solución	A - Bueno B - Aceptable C - Depende de las condiciones X - No apropiado										Notas
	Fierro-Acero	Aluminio	Cobre	Monel-400	S.S. 304, 321, 347	S.S. 316	Incoloy 800	Inconel 600	Titanio	Tefb n	
Aceite combustible	A	A	A	B	A	A	B	B	A		2,3,7
Aceite mineral	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
Acido acético	X	C	X	B	C	B	C	C	A	A	
Acido bórico	X	X	C	C	C	C	C	C	A	A	
Acido carbónico	C	B	C	C	B	B	B	A	A	A	
Acido cítrico	X	X	X	B	B	A	B	B	A	A	
Acido cloroacético	X	X	X	C	X	X	C	C	A	A	
Acido crómico	X	X	X	X	X	X	X	X	A	X	
Acido fórmico	X	B	B	B	A	X	B	B	C		
Acido fosfórico	X	X	C	C	X	B	C	C	X	A	5,9
Acido picrico	X	X	X	X	B	B	C	C		A	
Acido nítrico	X	X	X	X	C	C	X	X	A	A	
Acido sulfúrico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	A	
Acido sulfuroso	X	C	X	X	X	X	X	X	A	A	
Acido oleico	C	C	C	B	C	B	B	A	B	A	
Acido oxálico	X	X	B	B	X	X	X	B	X	A	
Aceite	A	A	A	A	A	A	A	A	A		7
Acetona	X	B	A	A	B	B	A	A	A	A	2
Agua de mar	X		X	A	C	C	B	B	A	A	
Agua desionizada	X	X	X	A	A	A	A	A			10
Agua desmineralizada	X	X	X	A	A	A	A	A			10
Agua potable	X	C	B	A	C	B	A	A	A	A	
Agua pura	X	X	X	A	A	A	A	A			10
Anilina	B	B	X	B	A	A	B	B	A		
Amoniaco	X	C	X	X	X	X	C	B	A		
Asfalto	A	X	X	X	A	A	A	A	A		2

Tabla 7.3 Guía de corrosión para algunos materiales (continuación).

Solución	Fierro-Acero	Aluminio	Cobre	Monel-400	S.S. 304, 321, 347	S.S. 316	Incoloy 800	Inconel 600	Titanio	Teflón	Notas
Bisulfato de sodio	X	C		C	X	X		C	C		
Bromuro de metilo	C	X	B	B	A	A	B	B	A		
Butanol	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	2
Carbonato de sodio	C	X	A	B	B	B	B	B	A	A	
Citrato de sodio	X	X	X		B	B				A	
Clorato de calcio	B	B	C	B	B	B	B	B			
Clorato de sodio	X	B	A	A	B	B	B	A	A	A	
Cloruro de calcio	B	A	B	B	B	B	B	B	A	A	
Cloruro de cobre	X	X	X	X	X	X	X	X	A	A	
Cloruro de etilo	B	B	A	B	B	A	B	A	A	A	2
Cloruro férrico	X	X	X	X	X	X	X	X	A	A	
Cloruro de magnesio	X	X	B	B	C	B	B	A	A		
Cloruro de metilo	X	X	A	C	C	C	C	C	A		
Cloruro de níquel	X	X	X	C	X	C	C	B	C	A	1,5
Cloruro de potasio	X	X	C	B	C	A	C	C	A		
Cloruro de sodio	X	X	B	A	X	X	B	A	C		
Cloruro de zinc	X	X	X	B	X	X	X	B	B	A	
Dicromato de potasio	C	B		B	B	B	B		A	A	
Diétilén glicol	B	B	B	B	A	A	B	B	A	A	
Dióxido de carbono	X	A	A	A	A	A	A	A	X	X	
Dióxido de sulfuro	C	C	C	X	C	B	C	C	A		
Eter	B	B	B	B	B	B	B	B	A		2
Etilén glicol	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	5
Fenol	B	B	A	B	C	B	B	B	A		
Fosfato de sodio	B	X	B	B	B	B	B	B	A	A	

Tabla 7.3 Guía de corrosión para algunos materiales (continuación).

Solución	A - Bueno B - Aceptable C - Depende de las condiciones X - No apropiado										Notas
	Fierro-Acero	Aluminio	Cobre	Monel-400	S.S. 304, 321, 347	S.S. 316	Incoloy 800	Inconel 600	Titanio	Teflón	
Fosfato de zinc						A				X	1,5
Freón	A	A	A	A	A	A	A	A			
Glicerol	B	A	B	A	A	A	A	A			
Hidrocarburos alifáticos	A	A	A	A	A	A	A	A			2
Hidrocarburos aromáticos	A	A	A	A	A	A	A	A			2
Hidróxido de bario	B	X	X	B	B	A	B	B	X		
Hidróxido de magnesio	A	B	A	B	A	A	A	A			
Hidróxido de potasio	X	X	X	B	C	C	C	B	C	A	
Hidróxido de sodio	C	X	X	C	X	C	B	B	C	A	8,6
Keroseno	A	A	A	A	A	A	A	A			2
Mercurio	A	X	X	B	A	A	A	B	A		
Nafta	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	2
Nitrato de amonio	A	C	X	X	A	A	X	X	X		
Nitrato de cobre	X	X	X	X	B	B	C	X		A	
Nitrato de magnesio	B	B	B	B	B	B	B	X	B		
Nitrato de plata	X	X	X	X	C	C	C	C	A		
Nitrato de potasio	B	A	B	B	B	B	B	B	A		
Nitrato de sodio	B	X	C	B	A	A	A	A	A		5
Nitrato férrico	X	X	X	X	B	B	X	X			
Nitrobenceno	A	B	B	B	B	B	B	B	A		2
Parafina	A	A	A	B	A	A					2,7
Percloroetileno	A	B	B	A	A	A	A	A	A		
Peróxido de hidrógeno	X	A	X	B	B	B	B	B	A		
Peróxido de sodio	B	B	X	B	B						
Persulfato de amonio	X	X	X	X	C	B	C	C		A	

Tabla 7.3 Guía de corrosión para algunos materiales (continuación).

Solución	Fierro-Acero	Aluminio	Cobre	Monel-400	S.S. 304, 321, 347	S.S. 316	Incoloy 800	Inconel 600	Titanio	Teflón	Notas
Petróleo crudo	B	A		A	A	A					2,3,7
Silicato de sodio	B	X	B	B	B	B	B	B	A	A	4
Sulfato de amonio	X	X	X	B	C	B	B	B	A		
Sulfato de bario	B	B	B	B	B	B	B	B	A		
Sulfato de cobre	X	X	C	X	B	B	C	X	A	A	
Sulfato de magnesio	B	B	B	A	B	B	B	A	A		
Sulfato de níquel	X	X	C	C	B	B	C	C		A	
Sulfato de potasio	C	A	B	A	A	A	B	B		A	
Sulfato de sodio	B	A	B	B	X	B	B	B	C	A	
Sulfato férrico	X	X	X	X	B	B	C	C	A		
Tetracloruro de carbono	X	X	A	A	A	A	A	A	A		
Tricloetano	A	A	A	A	A	A	A	A	A		
Tricloroetileno	A	A	B	B	A	A	A	A	A		
Trietilén glicol	A	A	A	A	A	A	A	A	A		

#### NOTAS

- 1.- Esta solución involucra una mezcla de varios componentes químicos, cuyas identidades y proporciones son desconocidas o sujetas a cambio sin nuestro conocimiento.
- 2.- Material inflamable.
- 3.- La composición química varía ampliamente.
- 4.- Los calentadores de inmersión directa no son prácticos. Usar calentadores con abrazaderas.
- 5.- La carga en la superficie del elemento no debe exceder los 20 W/in<sup>2</sup>.
- 6.- Para concentraciones más grandes que el 15%, la carga en la superficie del elemento no debe exceder los 20 W/in<sup>2</sup>.
- 7.- Ver el flujo térmico sugerido en la tabla 7.1.
- 8.- Remover las cortezas en el nivel del líquido.
- 9.- Limpiar seguido.
- 10.- Acero inoxidable pasivado, Inconel e Incoloy.

Tabla 7.4 Calentadores de Tira.

Material que será calentado	Temperatura deseada para el producto	Material de la envolvente	Temperatura del producto	Flujo térmico permitido (W/in. <sup>2</sup> )	
<b>Sólidos</b>					
Tanques, moldes	Hasta 1400°F en aplicaciones tipo abrazaderas	Fierro resistente a la corrosión	560 °F	3	
			150 °F	8	
			850 °F	7	
		Acero cromado	700 °F	10	
			400 °F	15	
			Incoloy	200 °F	28
			750 °F	20	
			1100 °F	8	
			1350 °F	3	
1400 °F	2.5				
<b>Aire / Gases</b>					
Velocidad libre del aire 1 ft/s	Hasta 1400°F en soportes montados	Fierro resistente a la corrosión	500 °F	3	
			100 °F	8	
			Acero cromado	950 °F	7
		Incoloy	800 °F	10	
			500 °F	15	
			1400 °F	3	
			400 °F	34	
Velocidad libre del aire 4 ft/s	Soportes montados	Fierro resistente a la corrosión	500 °F	3	
			250 °F	8	
			Acero cromado	1000 °F	7
		Incoloy	850 °F	10	
			550 °F	15	
			1400 °F	5	
600 °F	34				

Tabla 7.5 Calentadores Tubulares.

Material que será calentado	Temperatura deseada para el producto (°F)	Aplicación sugerida	Material de la envolvente	Temperatura del producto (°F)	Flujo térmico (W/in. <sup>2</sup> )
<b>Sólidos</b>					
Tanques, moldes	Hasta 1400	Abrazadera	Incoloy	Hasta 300	33
				Hasta 500	20
				Hasta 800	15
				Hasta 1000	10
				Hasta 1200	7
				Hasta 1400	2.5
<b>Líquidos</b>					
Agua limpia	Hasta 250	Inmersión	Cobre	250	Hasta 80
	Hasta 550	Inmersión	Incoloy	550	40
Solución acuosa	Hasta 200	Inmersión	Acero inox.	200	50
Sol. ligeramente corrosiva	Hasta 200	Inmersión	Incoloy	200	50
<b>Aceite</b>					
Viscosidad baja	Hasta 180	Inmersión	Acero	Hasta 180	23
Viscosidad media					15
Viscosidad alta					6.5
<b>Aire / Gases</b>					
Velocidad de movimiento 9 ft/s	Hasta 1500	Ductos	Incoloy	500	40
				800	32
				1000	25
				1200	15
				1500	2

Tabla 7.6 Calentadores de Inmersión de Collarín roscado.

Aplicación	Solución o tipo de calentador	Contenido alcalino o ácido	Material de la envolvente	Flujo térmico (W/in. <sup>2</sup> )	Material del collarín roscado
Soluciones acuosas y soluciones muy ligeras	Agua limpia	pH 6 a 8	Cobre	45	Latón
	Agua de proceso o soluciones muy débiles	pH 5 a 9 2-3% vol.	Acero inoxidable	45	Acero inoxidable
	Soluciones débiles	5-6% vol.	Incoloy	45	
	Agua desmineralizada	-	Incoloy o acero inox.	45	Acero inoxidable
	Agua desionizada	-	Incoloy o acero inox.	45	Acero inoxidable
Calentamiento de aceite	Viscosidad baja	-	Acero	23	Acero
	Viscosidad media	-	Acero	15	Acero
	Viscosidad alta	-	Acero	6	Acero
Calentador de especialidad	Tanques pequeños				
	-Agua de proceso	pH5 a pH9	Acero inoxidable	45	Latón
	-Agua desmineralizada	-	Acero inoxidable	45	Acero inoxidable
	-Soluciones severamente corrosivas	30-60% vol.	Hasteloy	15	Hasteloy
	-Aceite de baja viscosidad	-	Acero inoxidable	23	Acero

**Tabla 7.7** Calentadores de Inmersión con bridas.

Aplicación	Solución o tipo de calentador	Contenido alcalino o ácido	Material de la envolvente	Flujo térmico (W/in. <sup>2</sup> )	Material de la brida
Soluciones acuosas y soluciones muy ligeras	Agua limpia	pH 6 a 8	Cobre	45	Acero
	Agua de proceso o soluciones muy débiles	pH 5 a 9	Acero inoxidable	45	Acero
	Soluciones débiles	2-3% vol.	Incoloy	45	Acero
	Agua desmineralizada, pura o desionizada	5-6% vol. -	Incoloy	45	Acero inoxidable
Soluciones corrosivas de alta viscosidad	Soluciones ligeramente corrosivas	5-15% vol.	Acero inoxidable	23	Acero
	Soluciones corrosivas más severas	10-25% vol.	Incoloy	23	Acero
	Soluciones severamente corrosivas	30-60% vol.	Incoloy	15	Acero inoxidable
Calentamiento de agua de especialidad	Rehervidores de vapor	Tratada	Incoloy o cobre	-	Acero
	Agua en tanques de almacenamiento	Tratada	Cobre	-	Acero
Calentamiento de aceite	Viscosidad baja	-	Acero	23	Acero
	Viscosidad media	-	Acero	15	Acero
	Viscosidad alta	-	Acero	6.5	Acero
Calentamiento de aceite de depósito	Aceite de lubricación	-	Acero	15	Acero
Calentamiento de aire, gases y vapor	Baja temperatura	a 1100°F	Acero inox.	23	Acero inox.
	Alta temperatura	a 1600°F	Incoloy	23	Acero inox.

Tabla 7.8 Calentadores de Circulación.

Aplicación	Solución o tipo de calentador	Contenido alcalino o ácido	Material de la envolvente	Flujo térmico (watts/in <sup>2</sup> )	Material del recipiente
Soluciones acuosas y soluciones muy ligeras	Agua limpia	pH6 a 8	Cobre	45	Acero galvanizado
	Agua de proceso o soluciones muy débiles	pH5 a 9 2-3% vol.	Incoloy	45	Acero inoxidable
	Soluciones débiles	5-6% vol.	Incoloy	45	Acero inoxidable
	Agua desmineralizada, desionizada o pura	-	Incoloy	45	Acero inoxidable
Soluciones corrosivas y soluciones de alta viscosidad	Solución ligeramente corrosiva	5-15% vol.	Incoloy	23	Acero inoxidable
	Solución corrosiva más severa	10-25% vol.	Incoloy	23	Acero inoxidable
	Solución severamente corrosiva	30-60% vol.	Incoloy	15	Acero inoxidable
Calentamiento de aceite	Viscosidad baja	-	Acero	23	Acero
	Viscosidad media	-	Acero	15	Acero
	Viscosidad alta	-	Acero	10	Acero
Calentamiento de aire, gases y vapor	Temperatura baja a 750°F		Incoloy	23	Acero
	Temperatura alta a 1400°F		Incoloy	23	Acero inoxidable

**Tabla 7.9** Diámetros para tuberías de acero.

Diámetro nominal de la tubería (in.)	Cédula 40		Cédula 80	
	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)
1/8	6.8	10.3	5.5	10.3
1/4	9.2	13.7	7.7	13.7
3/8	12.5	17.1	10.7	17.1
1/2	15.8	21.3	13.9	21.3
3/4	20.9	26.7	18.8	26.7
1	26.6	33.4	24.3	33.4
1¼	35.1	42.2	32.5	42.2
1½	40.9	48.3	38.1	48.3
2	52.5	60.3	49.3	60.3
2½	62.7	73.0	59.0	73.0
3	77.9	88.9	73.7	88.9
3½	90.1	101.6	85.4	101.6
4	102.3	114.3	97.2	114.3
5	128.2	141.3	122.3	141.3
6	154.1	168.3	146.3	168.3
8	202.7	219.1	193.7	219.1
10	254.5	273.1	242.9	273.1
12	303.2	323.9	289.0	323.9
14	333.4	355.6	317.5	355.6
16	381.0	406.4	363.6	406.4
18	428.7	457.2	409.6	457.2
20	477.9	508.0	455.6	508.0
24	574.7	609.6	547.7	609.6

Tabla 7.10 Resistencia eléctrica de alambres ( $\Omega/\text{km}$ ) a 20°C

Calibre AWG	Diámetro (mm)	Cobre $\rho = 1.7241$ $\mu\Omega\text{cm}$	Nichrome $\rho = 112$ $\mu\Omega\text{cm}$	Aluminio $\rho = 2.828$ $\mu\Omega\text{cm}$	Constantano $\rho = 44.1$ $\mu\Omega\text{cm}$	Tungsteno $\rho = 5.51$ $\mu\Omega\text{cm}$
0000	11.68	0.1608				
000	10.40	0.2028				
00	9.266	0.2557				
0	8.252	0.3224				
2	6.544	0.5127				
4	5.189	0.8152				
6	4.115	1.296				
8	3.264	2.061				
10	2.588	3.277	212.8	5.38	83.8	10.5
12	2.053	5.211	337.5	8.55	133	16.7
14	1.628	8.285	540.5	13.6	212	26.5
16	1.291	13.17	851.1	21.6	337	42.1
18	1.024	20.95	1384	34.4	536	66.9
20	0.8118	33.31	2162	54.6	852	106
22	0.6438	52.96	3460	86.9	1350	169
24	0.5106	84.21	5481	138	2150	269
26	0.4049	133.9	8758	220	3420	428
28	0.3211	212.9	13943	349	4320	540
30	0.2546	338.6	22140	555	5450	680
32	0.2019	538.3	34604	883	8660	1080
34	0.1601	856.0	55760	1400	1380	1720
36	0.1270	1361	88560	2230	2190	2740
38	0.1007	2164	138383	3550	3480	4350
40	0.0799	3441	230387	5640	8800	1100

Tabla 7.11 Conductividades térmicas de gases.

k = cal / (cm s K) x 10 <sup>7</sup>					
Gas	T (K)	k	Gas	T (K)	k
Acetato de etilo	319	298	Etileno	273	415
Acetato de metil	273	244	Freón 11	310	214
Acetileno	273	444	Helio	273	3383
Acetona	273	236	Hidrógeno	300	4227
Ácido sulfhídrico	273	313	Isobutano	273	332
Agua	373	521	Isopentano	273	298
Aire	273	279	Mercurio	473	815
Amoniaco	273	527	Metano	300	819
Argón	366.3	496	Metanol	273	341
Benceno	273	213	Monóxido de carbono	273	555
Ciclohexano	375	393	Neón	366	1340
Cloro	273	177	n-Butano	273	322
Cloroformo	273	155	n-Heptano	373	423
Cloruro de etileno	273	227	n-Hexano	273	297
Cloruro de metileno	273	161	Nitrógeno	373	749
Cloruro de metilo	273	219	Óxido nítrico	273	569
Diclorodifluorometano	273	198	Óxido nítrico	273	361
Diclorometano	273	160	Oxígeno	300	635
Dióxido de azufre	273	205	Pentano	273	304
Dióxido de carbono	300	398	Propano	273	624
Etano	273	437	Sulfuro de carbono	273	166
Etanol	293	365	Tetracloruro de carbono	273	213
Eter etílico	273	315			

Tabla 7.12 Conductividades térmicas de líquidos.

k = kcal / (m h°C) x 10 <sup>3</sup>					
Sustancia	T (°C)	k	Sustancia	T (°C)	k
Aceite de oliva	20	144	Etanol	20	156
Acetato de amilo	10	123	Eter etílico	30	119
Acetato de butilo	25	125	Etil benceno	30	128
Acetato de etilo	20	150	Etilenglicol	0	227
Acetona	30	152	Freón 11	18	89
Ácido acético	20	147	Gasolina	30	116
Ácido láurico	100	151	Glicerina	20	244
Ácido oleico	100	137	Glicol	0	228
Ácido palmítico	100	129	Heptano	30	120
Ácido sulfúrico (90%)	30	312	Hexano	30	119
Agua	0	508	m-Xileno	20	134
Agua	20	514	Mercurio	28	7190
Agua	100	576	Metanol	20	185
Alcohol alílico	25	155	Nitrobenceno	30	141
Alcohol amílico	30	140	Nitrometano	30	186
Alcohol etílico (60%)	20	262	Nonano	30	125
Alcohol isoamílico	30	132	o-Xileno	20	134
Amoniaco	15	430	Octano	30	123
Anilina	20	150	Pentano	30	116
Benceno	30	137	Plomo	500	13520
Bromo benceno	30	110	Potasio	400	34416
Bromuro de etilo	20	104	Propanol	30	147
Cloro benceno	10	123	Queroseno	20	128
Cloroformo	30	110	Salmuera de NaCl (12.5%)	30	506
Cloruro de metilo	30	132	Salmuera de NaCl (25%)	30	497
Dawterm A	93	128	Sodio	300	65124
Decano	30	126	Sulfuro de carbono	30	138
Dicloroetano	50	122	Tetracloruro de carbono	6	168
Diclorometano	30	143	Tolueno	30	128
Dióxido de azufre	30	165	Tricloroetileno	50	118

Tabla 7.13 Conductividades térmicas de sólidos.

k = kcal / (m h °C)					
Sustancia	T (°C)	k	Sustancia	T (°C)	k
Algodón	0	0.04727	Hielo	0	1.9388
Arcilla	20	1.1	Ladrillo de caolín	200	0.0743
Arcilla 4% H <sub>2</sub> O	0	0.4899	Ladrillo de construcción	20	0.593
Arena 4% H <sub>2</sub> O	0	1.2978	Ladrillo refractario	200	0.8595
Asbesto	0	0.129	Ladrillo rojo	15	0.54
Asbesto corrugado	30	0.0743	Lámina de corcho	15	0.0371
Asbesto laminado	0	0.1426	Lana	30	0.0309
Aserrín	21	0.044	Lana de fibra de vidrio	38	0.0355
Asfalto	0	0.0609	Lana de fibra mineral	38	0.0336
Azufre monoclinico	100	0.133	Madera de cedro	30	0.165
Azufre rómbico	15	0.237	Madera contrachacada	0	0.128
Bagazo de caña	15	0.0416	Madera de pino	15	0.1293
Baquelita	20	0.2	Madera de roble	15	0.178
Bismuto	315	12.758	Magnesia (85%)	38	0.05844
Carbón (antracita)	20	0.22	Mampostería ordinaria	0	1.1
Carbón (pulverizado)	20	0.1	Mármol	20	2.5279
Carbonato de magnesio	15	0.0505	Óxido de magnesio	15	0.4758
Cartón	20	0.12 a 0.3	Papel	15	0.111
Cartón prensado	20	0.22	Papel	20	0.111
Cemento portland	90	0.2527	Piedra de lava	20	0.728
Concreto armado	0	1.33	Piedra pómez	21	0.208
Concreto (piedra de)	0	0.792	Porcelana	200	1.3085
Corcho (molido)	30	0.037	Seda	20	0.031
Corcho (prensado)	30	0.0372	Tableros de fibracel	21	0.012
Cuero	15	0.1368	Tierra de diatomáceas	200	0.0758
Filtro de lana	30	0.0446	Vidrio de borosilicato	30	0.9368
Grafito	15	4.32	Vidrio Pyrex	20	1.006
Granito	20	1.487	Vidrio de ventana	15	0.447
Gravilla	20	0.45	Yeso	20	0.5948

Tabla 7.14 Conductividades térmicas de metales.

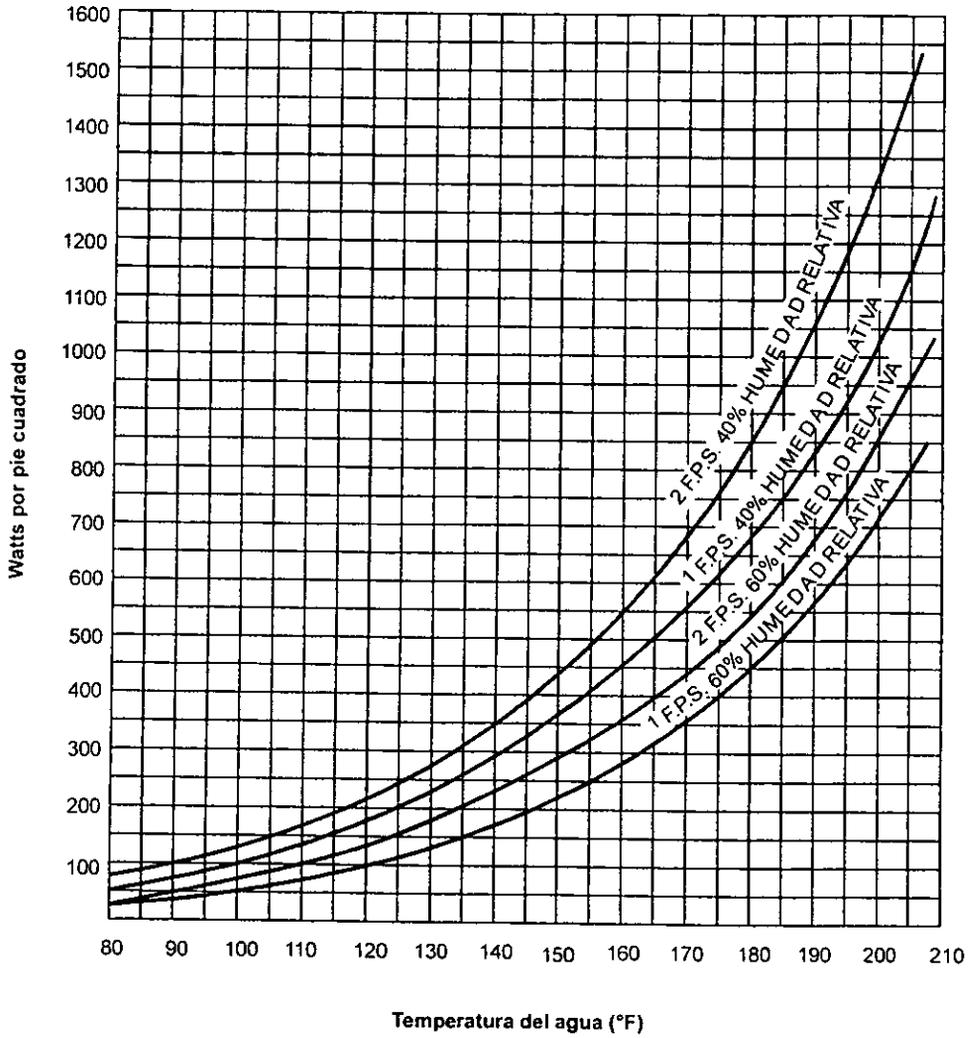
k = kcal / (m h °C)					
Sustancia	T (°C)	k	Sustancia	T (°C)	k
Acero al cromo	15	26.76	Estaño	0	53.53
Acero al magnesio (10% Mn)	20	15	Hastelloy A	100	8.32
Acero al manganeso	15	14.87	Hierro dulce	20	51
Acero al silicio (5% Si)	20	16	Hierro fundido	100	47.58
Acero al silicio	15	16.357	Hierro puro	20	62
Acero al tungsteno (10 W)	20	42	Hidronalium	15	96.65
Acero al níquel	15	22.305	Inconel	5	8.92
Acero al tungsteno	15	41.636	Invar	15	9.21
Acero de níquel cromo (18 N, 8 Cr)	300	22.3	Latón	100	89.39
Acero (1% al carbón)	100	38.66	Magnesio	0	136.8
Acero inoxidable 304	100	13.97	Molibdeno	20	5.35
Acero inoxidable 308	100	13.06	Monel	5	13.38
Acero inoxidable 316	100	13.97	Níquel	0	53.53
Acero inoxidable	100	13.82	Oro	100	252
Aleación de níquel (70 N, 28 Cr, 2 Fe)	0	15.46	Plata	100	354
Aleación de níquel (62 N, 12 Cr, 26 Fe)	0	11.59	Plata alemana	100	21.4
Aluminio	0	173.9	Platino	100	62.30
Alusil	15	138.29	Plomo	0	29.74
Antimonio	0	15.76	Sicromal 8	15	19.33
Bismuto	5	5.79	Sicromal 12	15	16.357
Bronce	0	83.27	Silumin	15	141.26
Bronce de aluminio	20	71	Tántalo	17	47.58
Cadmio	100	77.62	Tungsteno	20	6.27
Cinc	0	96.65	Uranio	15	25.57
Cobre	0	333			
Constantan (60%Cu, 40%Ni)	20	19.5			

## **ANEXO III**

## **GRAFICAS**

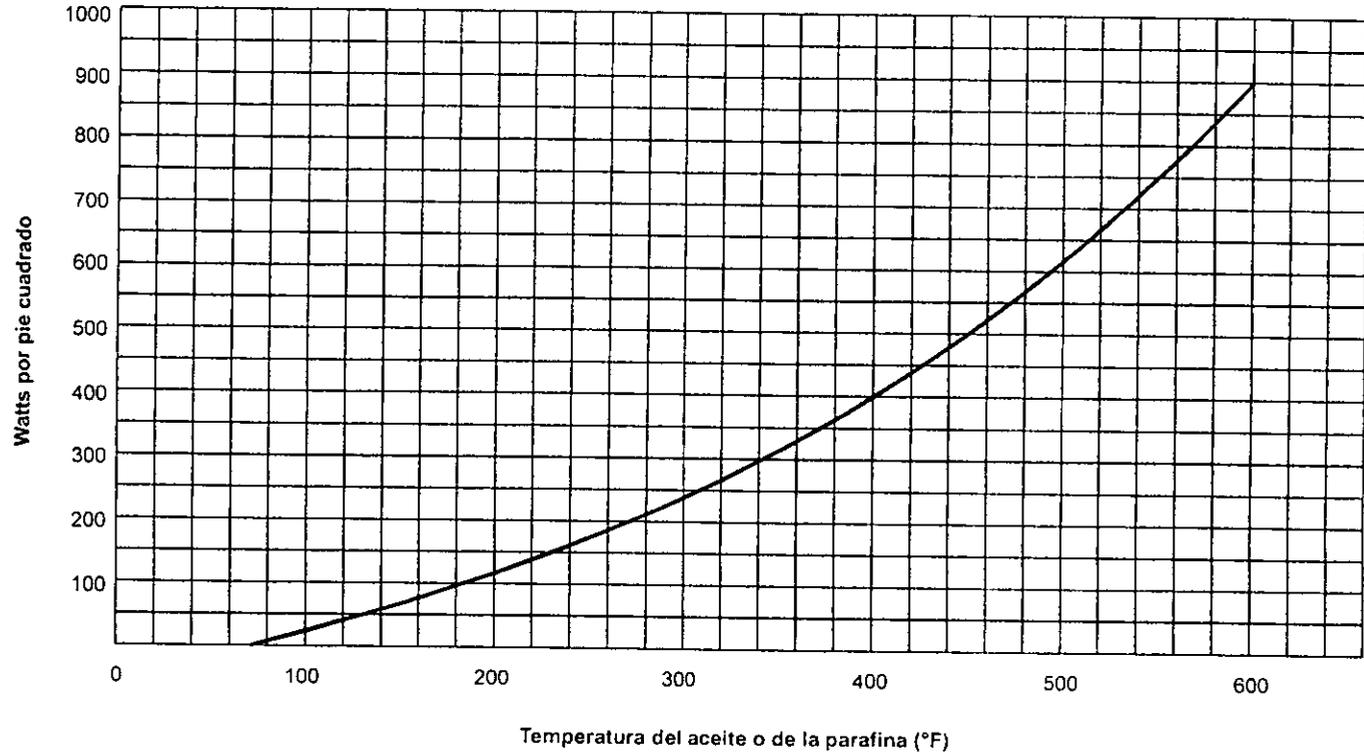
Gráfica 7.1

Calor perdido de la superficie del agua.



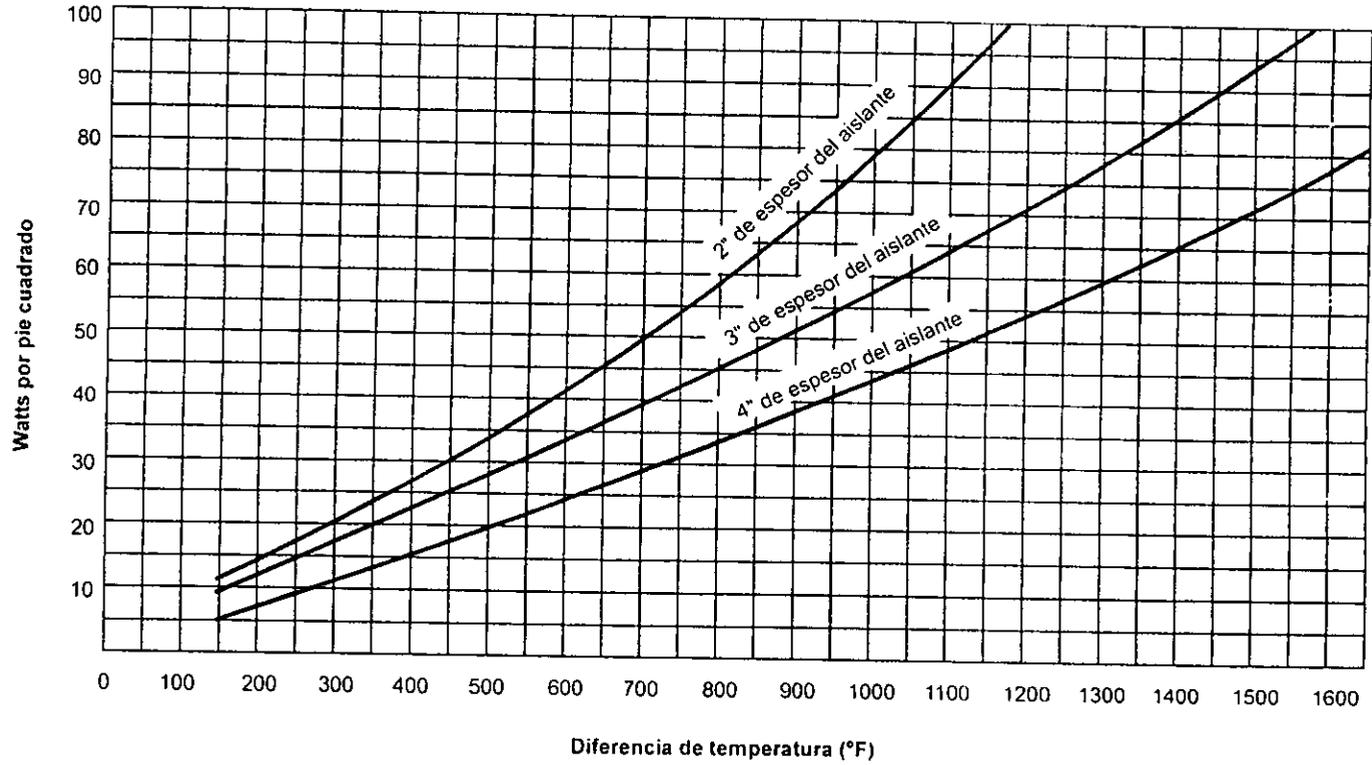
Gráfica 7.2

Calor perdido de superficies de aceites y parafinas.



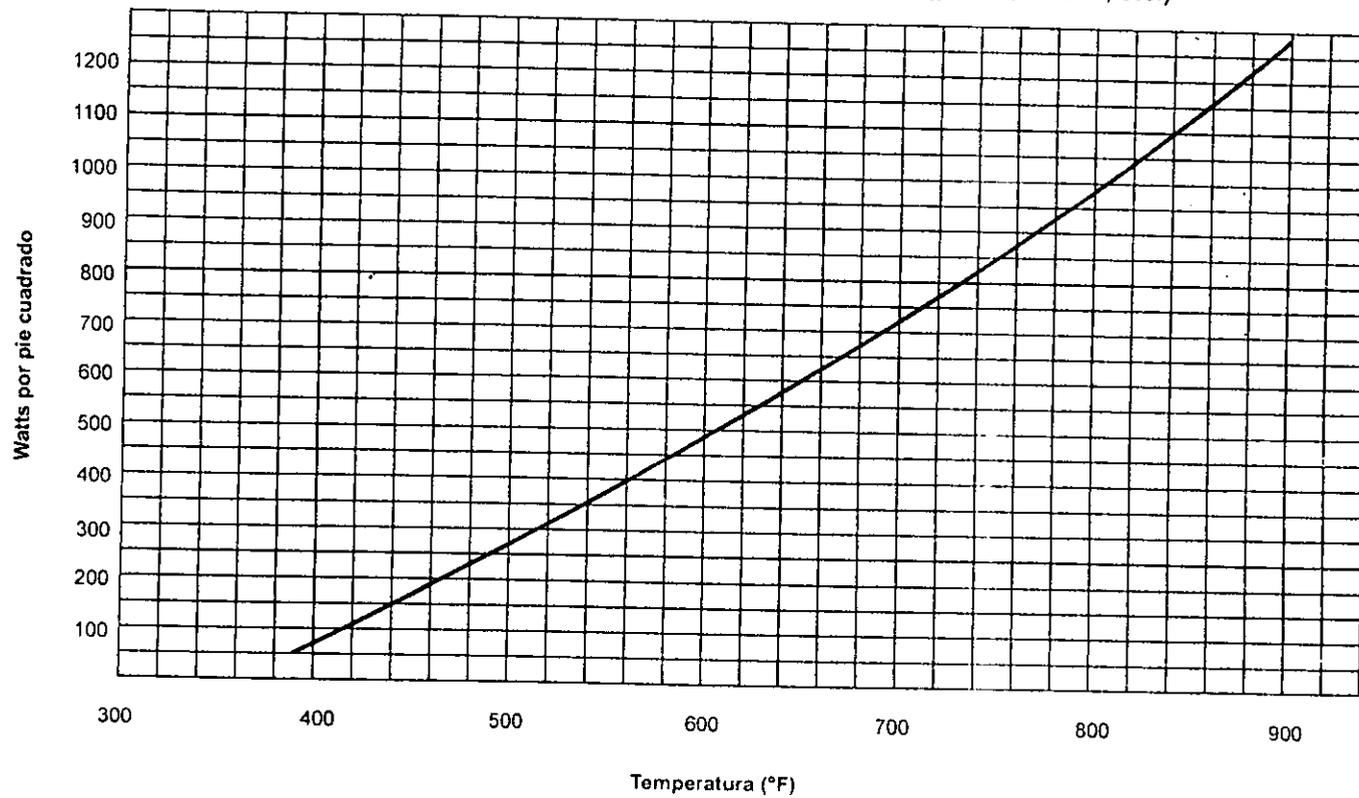
Gráfica 7.3

Calor perdido de paredes de tuberías, tanques, etc. aislados.



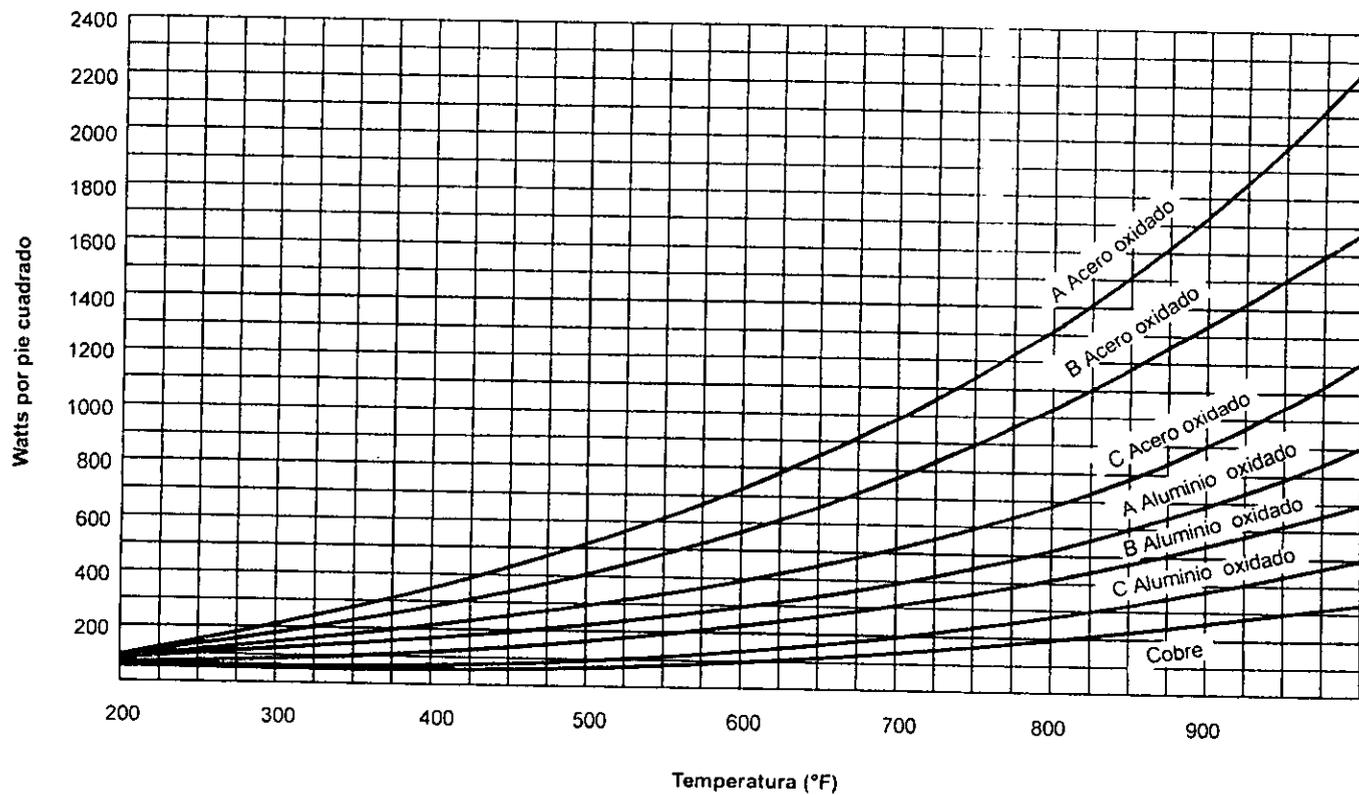
Gráfica 7.4

Calor perdido de superficies de metales fundidos (plomo, estaño, etc.)



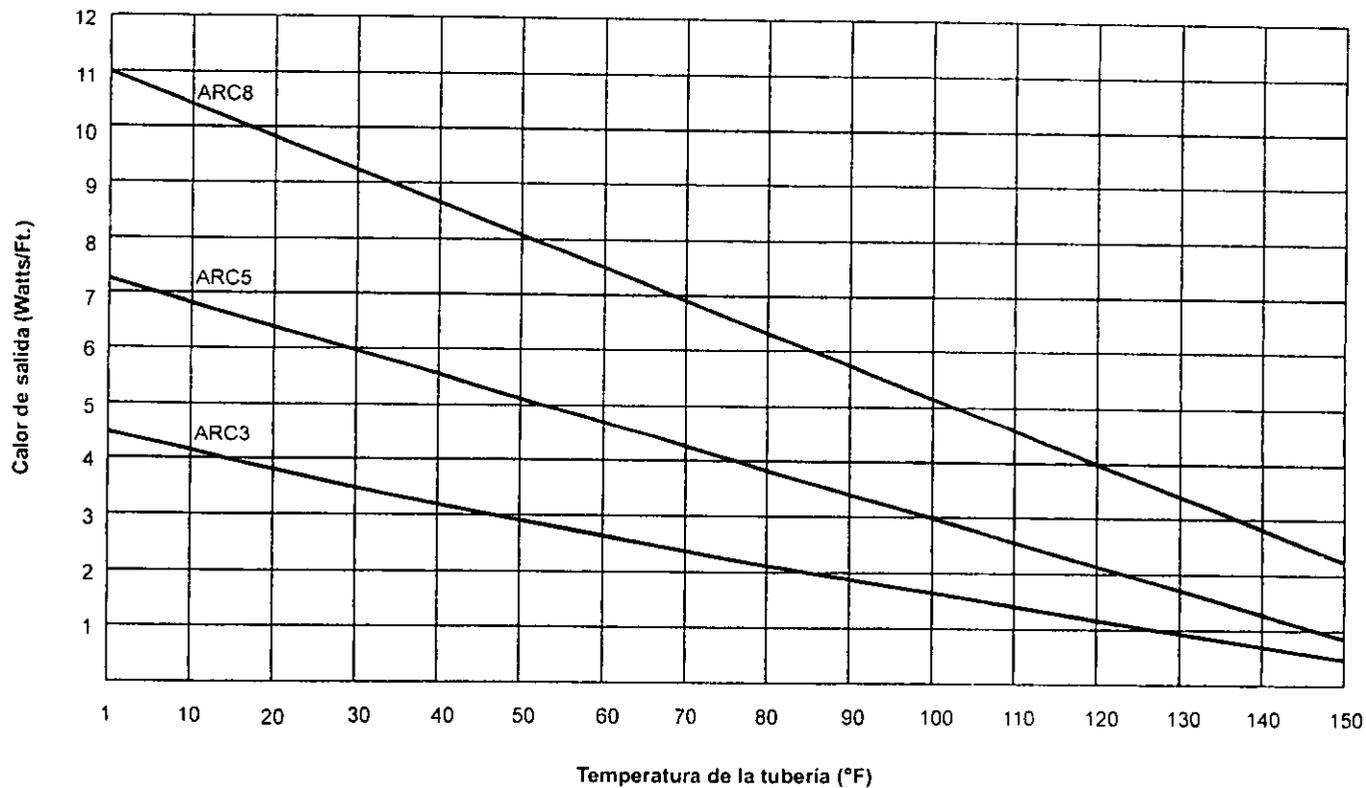
Gráfica 7.5

Calor perdido de superficies de metales no aislados.



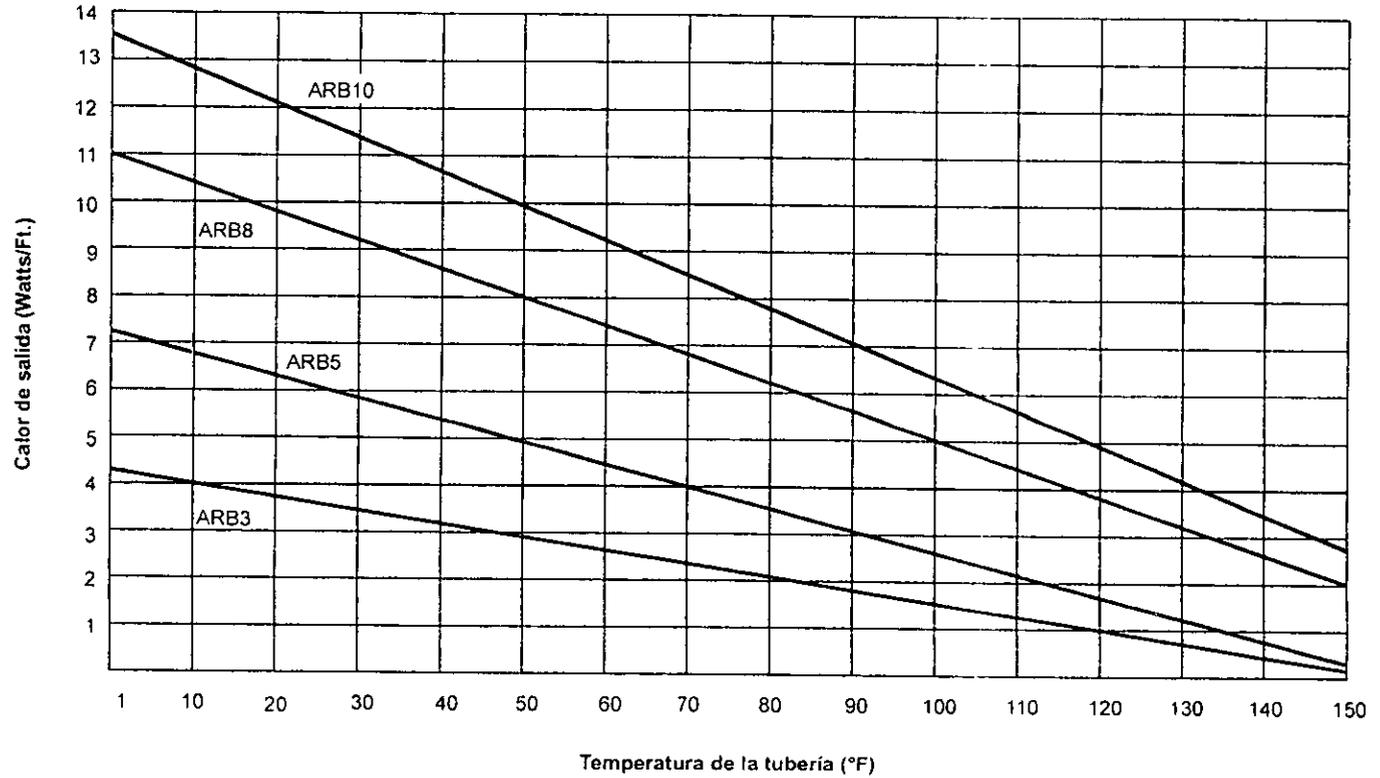
Gráfica 7.6

Cables de autorregulación contra el congelamiento.



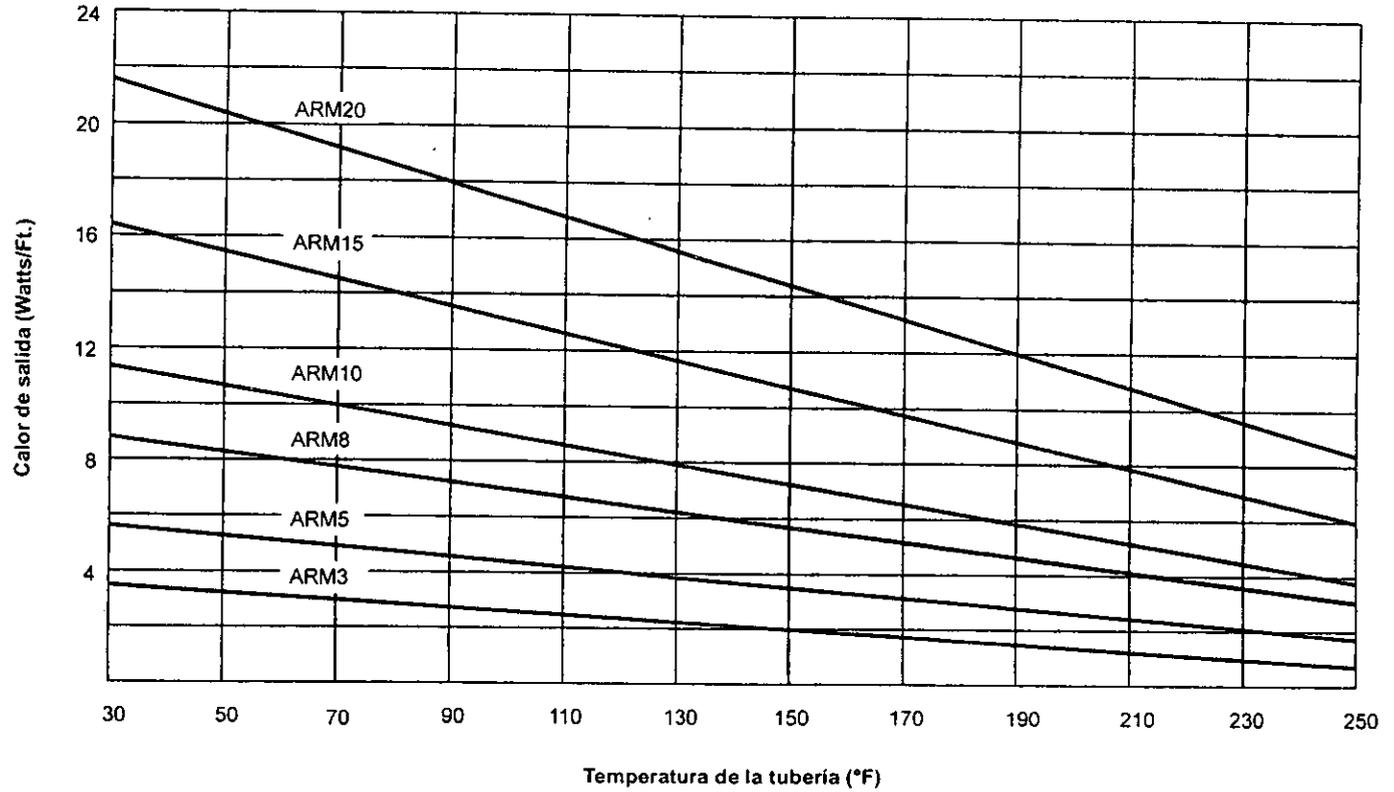
Gráfica 7.7

Cables de autorregulación de baja temperatura.



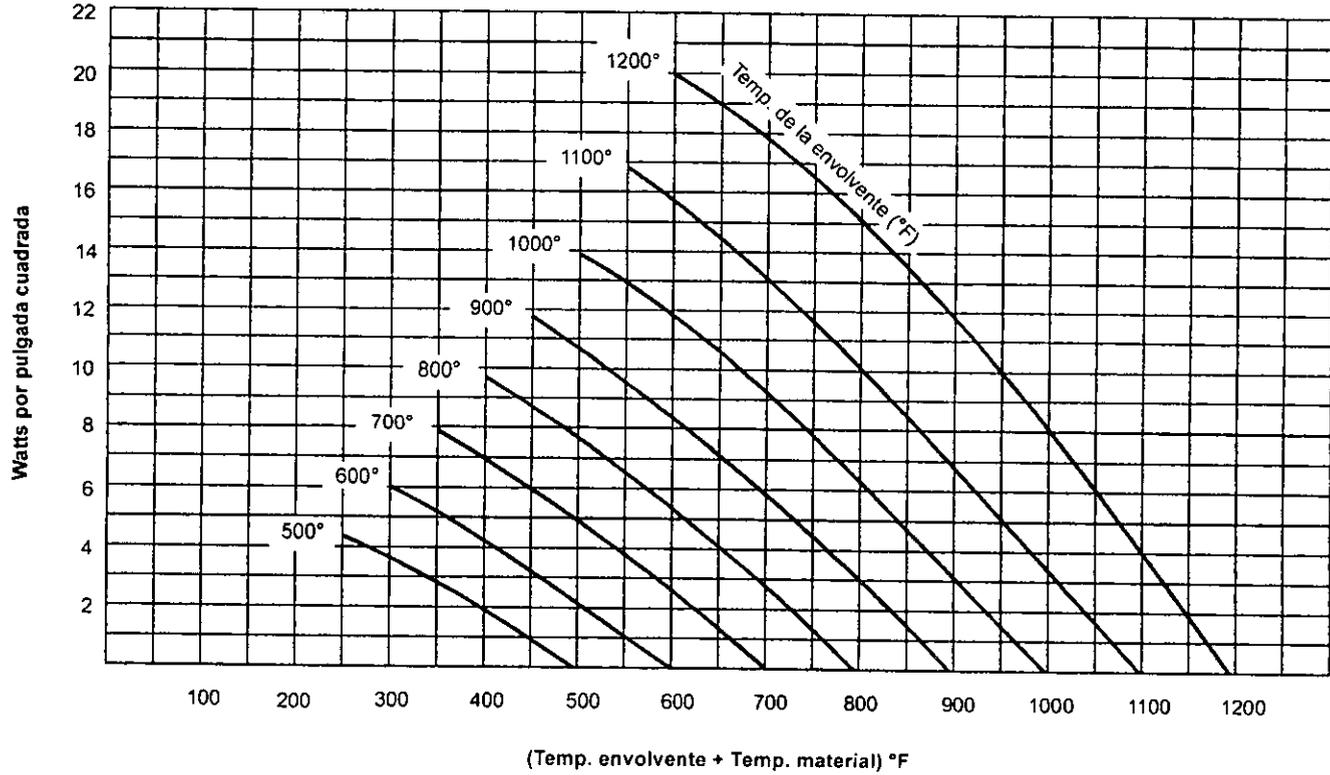
Gráfica 7.8

Cables de autorregulación de temperatura media.



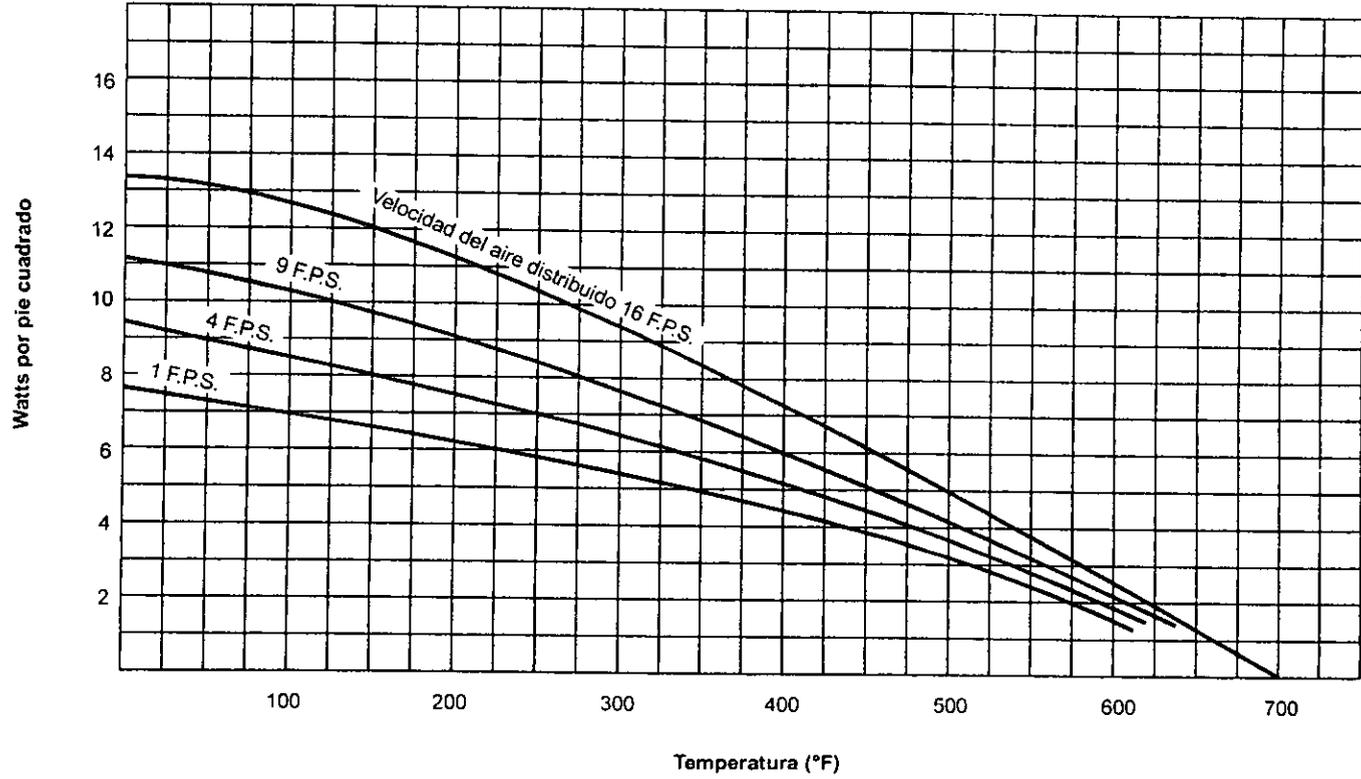
Gráfica 7.9

Flujo térmico de los calentadores de tira tipo abrazadera.



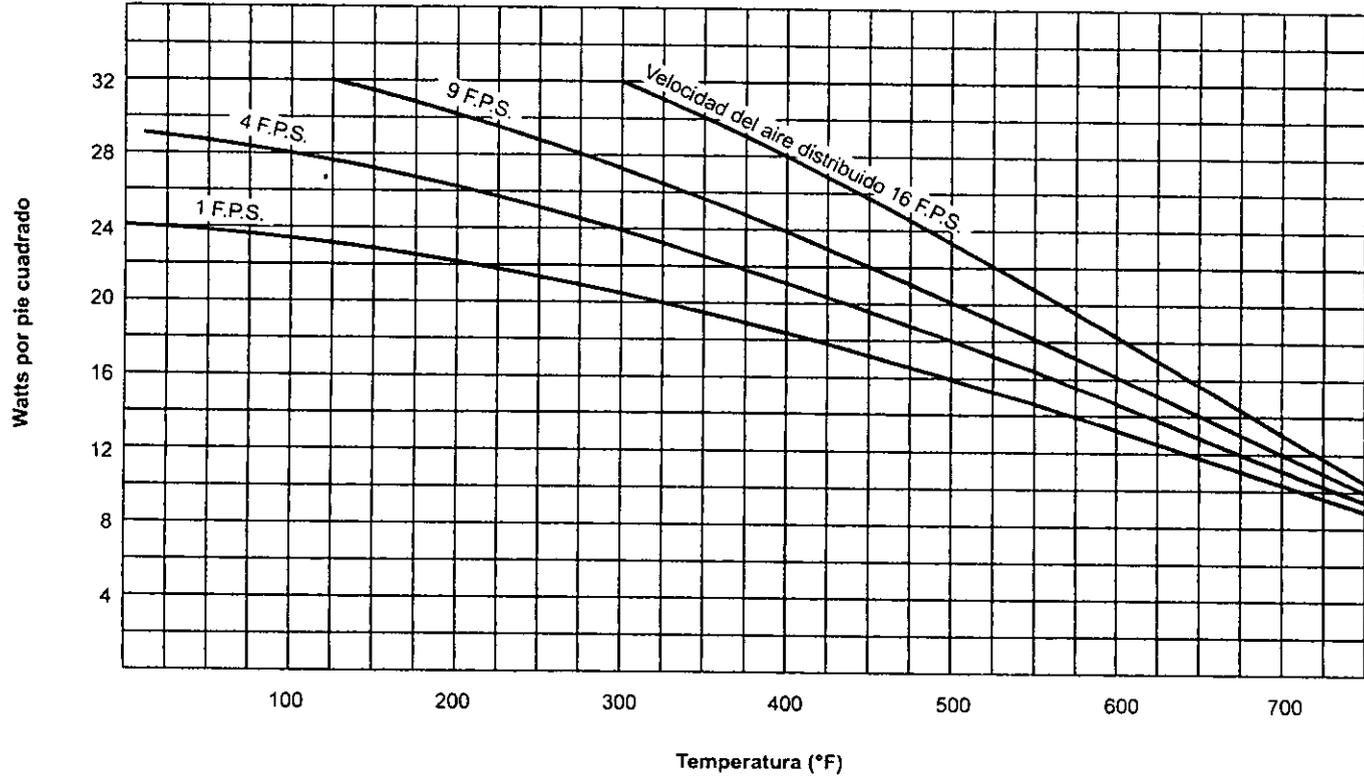
Gráfica 7.10

Flujo térmico de los calentadores de tira.



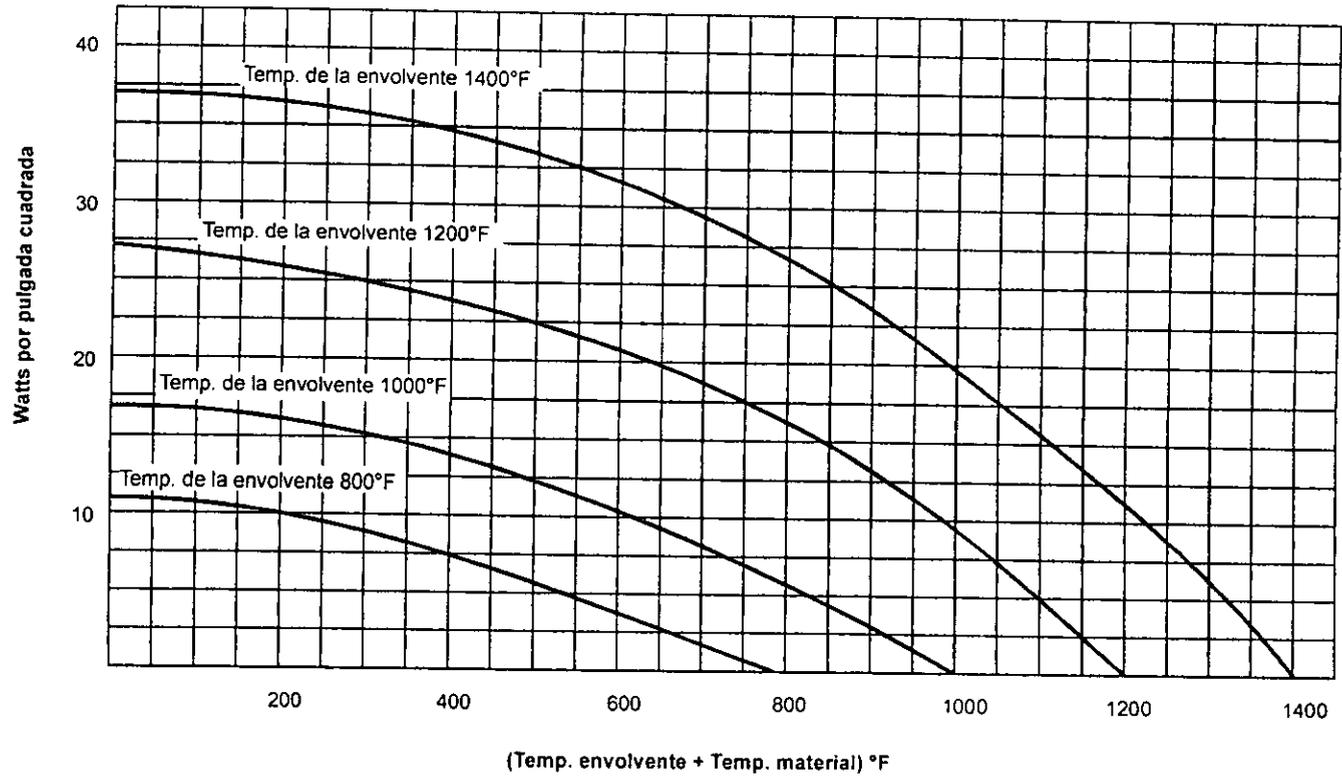
Gráfica 7.11

Flujo térmico de los calentadores de tira aletados.



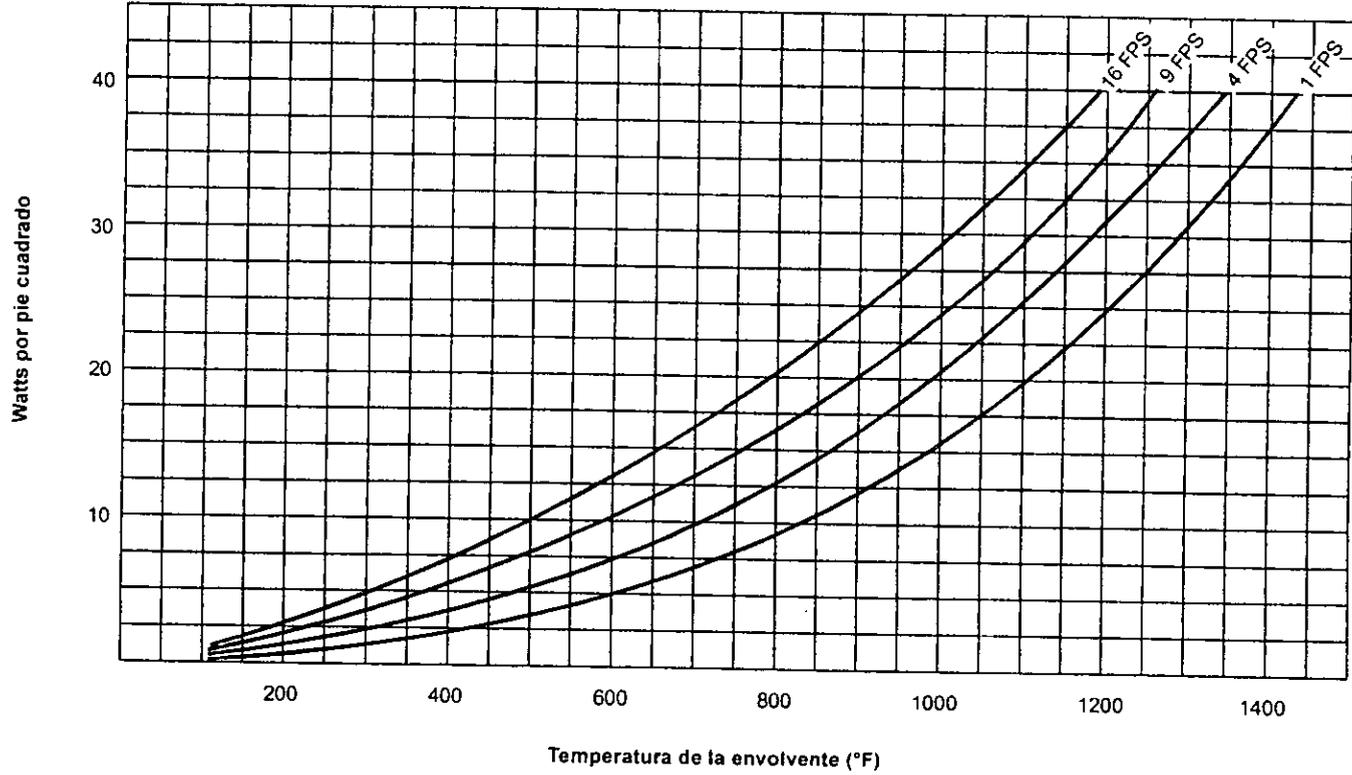
Gráfica 7.12

Flujo térmico de los calentadores tubulares con abrazaderas.



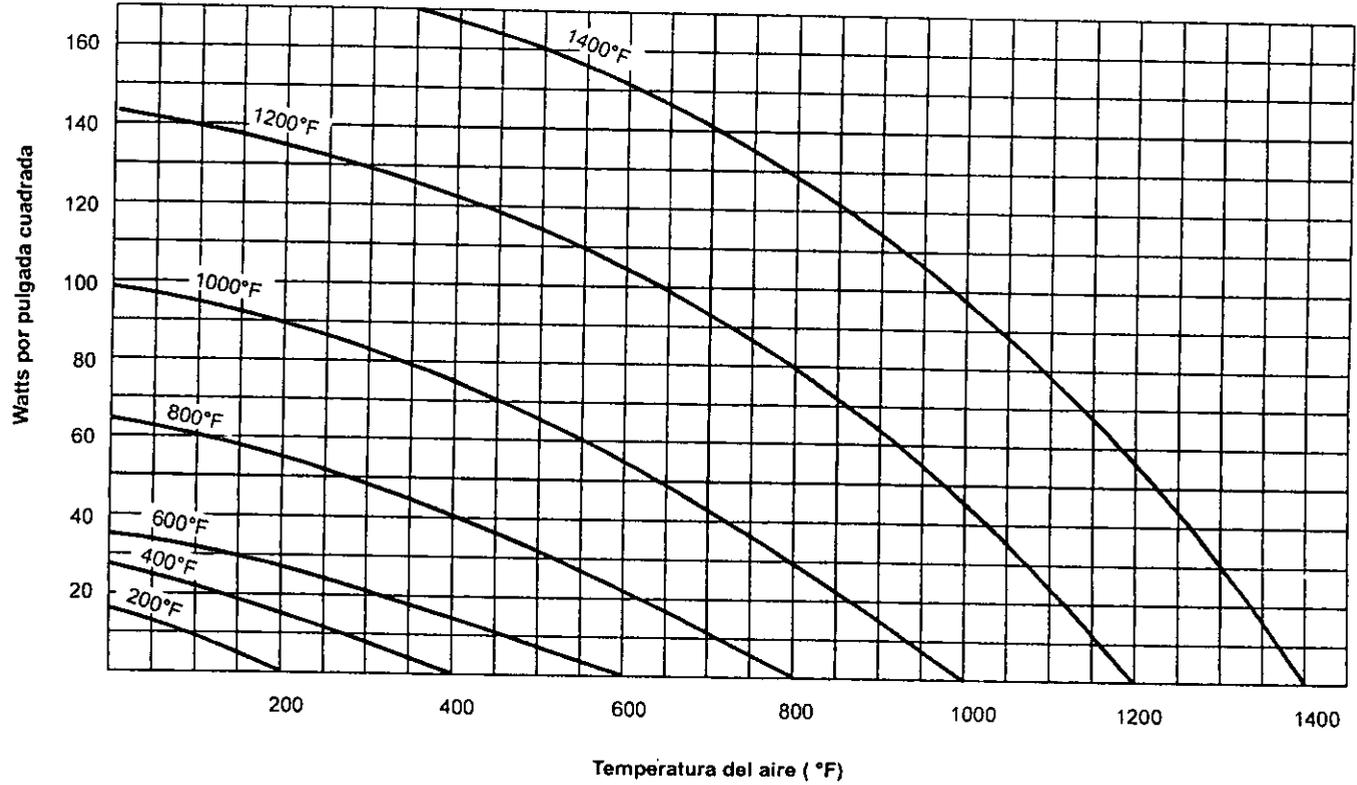
Gráfica 7.13

Flujo térmico de los calentadores tubulares.



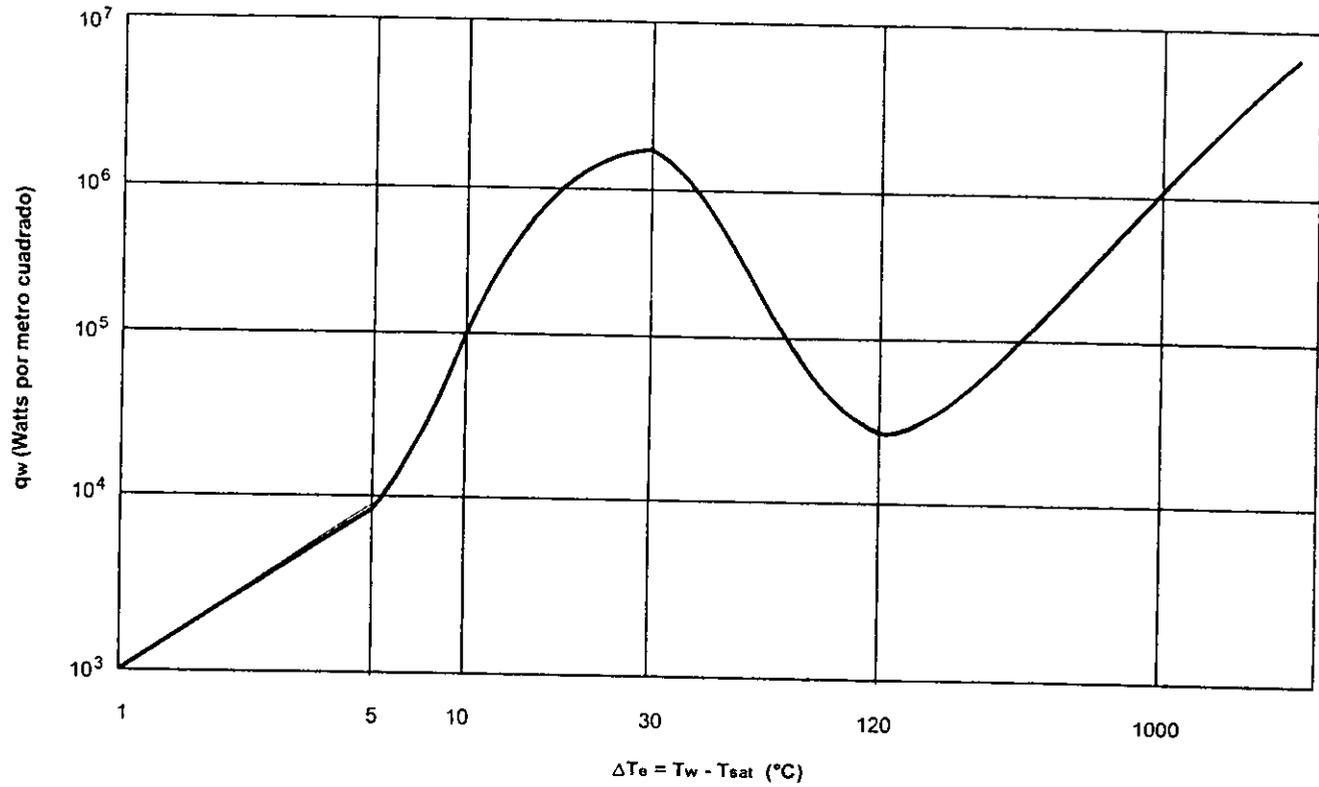
Gráfica 7.14

Flujo térmico de los calentadores tubulares con aletas.



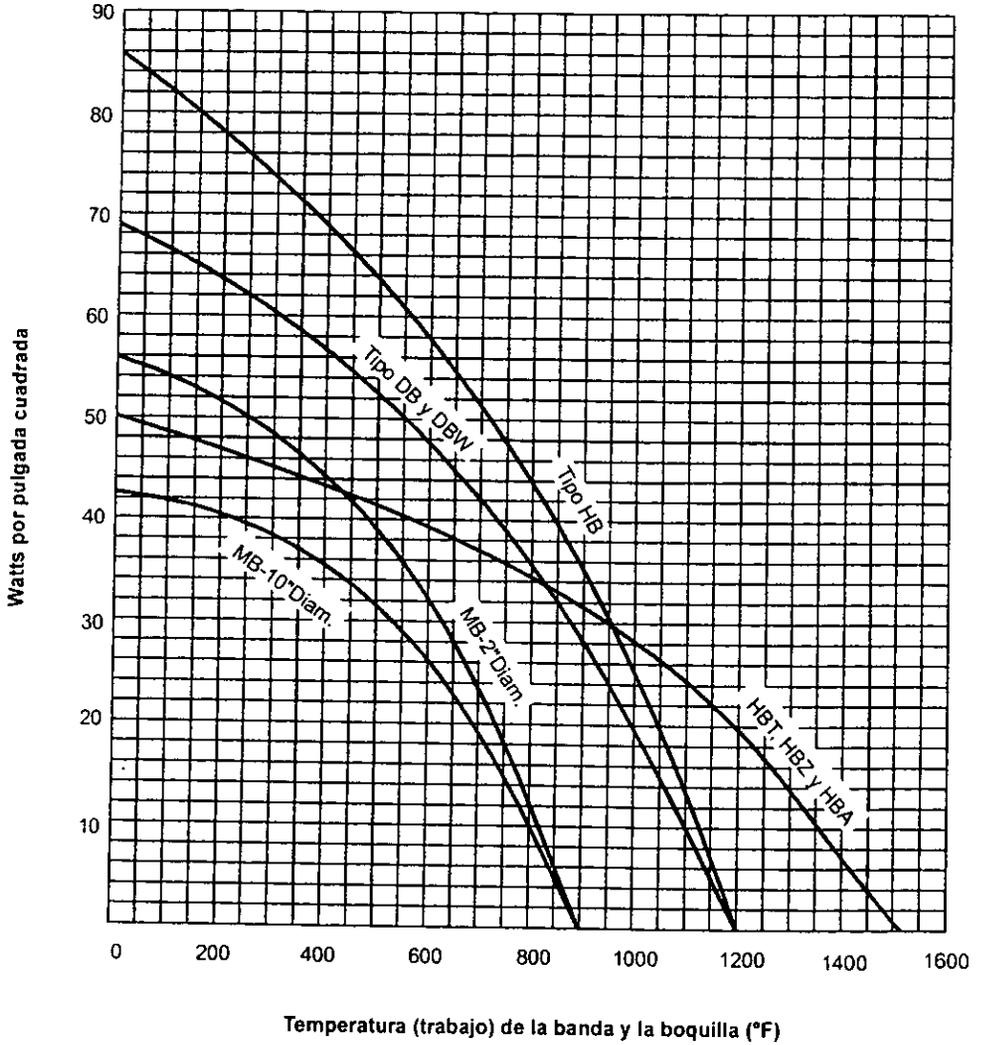
Gráfica 7.15

Curva de ebullición para el agua a 1 atm.



Gráfica 7.16

Flujo térmico permitido de los calentadores de banda.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Hagen, K.D., Heat Transfer with Applications  
ed. Prentice Hall, U.S.A., 1999.
2. Necati, M., Heat Transfer, A Basic Approach  
ed. McGraw-Hill, U.S.A., 1985.
3. Mikheyev, M., Fundamentos de Transferencia de Calor  
ed. Mir, Moscú, 1968.
4. Kern, D., Procesos de Transferencia de Calor  
Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1981.
5. Anaya, A. & A. Ortiz, Curso de Transferencia de Calor  
Tomo I, Instituto Mexicano del Petróleo, México.
6. Skilling, H., Circuitos en Ingeniería Eléctrica  
Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México, 1967.
7. The electric Heaters Handbook, vol.29  
Omega Engineering, Inc., Stamford, U.S.A., 1995.
8. Providing Heating Expertise  
Watlow, St. Louis, Missouri, U.S.A.
9. Electric Heating Products, Control and Systems  
Chromalox Industrial Heating Products  
Emerson Electric Company.

10. Equipos para Calentamiento Eléctrico  
Electrotermia Fabrestel, Santiago, Chile.
11. Perry, R., Manual del Ingeniero Químico  
Sexta Edición, Tomo III  
ed. McGraw-Hill, México, 1992.
12. McKetta, J., Heat Transfer Design Methods  
Marcel Dekker, Inc., 1992.
13. Crane, Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías  
McGraw-Hill, México, 1987.
14. Nava, David., Manual para el diseño mecánico  
de transmisores de calor de tubos y envolvente  
Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
I.P.N., México, 1979.
15. ASME, Sección II, Especificación de Materiales  
Parte A y parte B, Nueva York, 1980