

Capítulo 5

Procesos basados en transferencia de calor

Al diseñar un proceso es necesario estudiar los principios básicos que rigen la transferencia de calor entre los sistemas. Prácticamente, todas las operaciones que tienen lugar en la industria química conllevan la producción o absorción de energía en forma de calor. En los procesos industriales se gasta mucho dinero calentando fluidos y, en muchas ocasiones, se hace necesario recuperar el calor con el objeto de ahorrar combustible.

La forma en que el calor se transfiere así como la diversidad de los dispositivos en los cuales estos fenómenos suceden hace que el campo de las aplicaciones sea bastante extenso. En este capítulo, solo se van a considerar algunos procesos para los cuales se puede simplificar su modo de funcionamiento, de manera que el lector pueda comprender la forma en que operan los mismos sin necesidad de estar especializado en el tema.

La transferencia de calor entre (por lo menos) dos cuerpos que están en contacto a diferentes temperaturas se da desde el objeto a mayor temperatura hacia el de menor temperatura. En consecuencia, la temperatura del primer objeto decrece mientras que la del segundo se incrementa. Los mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación. Estos mecanismos pueden presentarse, en un determinado proceso, en forma paralela o aislada, es decir, que puede haber transferencia de calor de distintas formas simultáneamente o solo de una forma.

La **conducción** consiste en la transferencia de calor de un cuerpo a otro sin aparente movimiento de las partículas del cuerpo, por lo que se le define como *difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio*. La conductividad térmica es la propiedad que mide la capacidad de los materiales para transferir calor por conducción. Un ejemplo sencillo de este mecanismo es el calor que se siente en uno de los extremos de cualquier varilla metálica, cuando el otro extremo es calentado por algún medio (por un mechero o una vela, por ejemplo). Los metales sólidos tienen valores elevados de conductividad térmica.

La **convección** es un fenómeno macroscópico que puede ocurrir cuando actúan fuerzas sobre una corriente de fluidos (o sobre una partícula) manteniendo su movimiento frente a fuerzas de fricción. Físicamente puede entenderse como una *difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio más una transferencia de energía debida a un movimiento de todo el volumen del fluido*. El calentamiento y enfriamiento de gases y líquidos son los ejemplos más habituales de transmisión de calor por convección. Dependiendo de si el flujo del fluido es provocado artificialmente o no, se distinguen dos tipos: convección forzada y convección libre (también llamada natural). La convección forzada implica el uso de algún medio mecánico, como una bomba o un ventilador, para provocar el movimiento del fluido. Un ejemplo de este mecanismo se da cuando una corriente de aire caliente, que emana de un horno, fluye a través de una habitación.

La **radiación** es el término con el que se define la transferencia de calor en el espacio a través de ondas electromagnéticas. Si el espacio que atraviesan las ondas está vacío no habrá transformación de energía en forma de calor. Si hay algún cuerpo en ese espacio, la radiación podrá ser transmitida, reflejada o absorbida por ese cuerpo. Solo la radiación absorbida aparecerá como calor. Por ejemplo, una superficie pulida (como un espejo) tiende a reflejar casi toda la radiación que le impacta. Una superficie oscura y rugosa absorbe gran parte de la radiación y se calienta.

Las aplicaciones que se estudian seguidamente se basan en los mecanismos de transferencia de calor explicados. En cada caso, se hace mención al principio de operación así como a otros aspectos importantes en el funcionamiento de los dispositivos. Los aspectos aquí ilustrados se fundamentan en el texto e imágenes de McCabe, Smith y Harriott (1993), así como en la información extraída de *Ingeniería Térmica y de Fluidos*, por Pedro Fernández Díez, desde: <http://libros.redsauce.net/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/17.pdf>

5.1 Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para recuperar, de manera eficiente, calor entre dos corrientes o fluidos de un proceso. El calor es recuperado al transferirse desde la corriente a mayor temperatura hacia la corriente de menor temperatura. La transmisión de calor se lleva a cabo mediante los mecanismos de conducción y de convección. Las corrientes o fluidos pueden estar separados por una barrera sólida o pueden estar en contacto.

Los intercambiadores son realmente muy útiles en la industria. Son parte esencial de los dispositivos de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico. Un intercambiador típico es el radiador del motor de un automóvil, en el que el fluido refrigerante, calentado por la acción del motor, se refrigera por la corriente de aire que fluye sobre él y, a su vez, reduce la temperatura del motor volviendo a circular en el interior del mismo.

Prácticamente, cualquier proceso químico debe llevarse a cabo a cierta temperatura (que, por lo general, es diferente a la temperatura ambiente). En los procesos reactivos siempre se involucran grandes cantidades de calor, haciendo necesario calentar o enfriar los componentes. El calor retirado en los enfriadores, por ejemplo, es utilizado para precalentar otros componentes del proceso que requieren estar a temperaturas elevadas. Este constante precalentamiento y/o enfriamiento se traduce en buena parte en rentabilidad de un proceso químico industrial, lo que finalmente es una de las variables más relevantes (si no la más relevante de todas) en la cadena de producción.

5.1.1 Clasificación de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor pueden ser clasificados de diversas maneras, dependiendo del criterio que se tome en cuenta. En un primer intento de clasificación, se tiene tres categorías:

- ♦ **Regeneradores:** intercambiadores en donde el flujo caliente fluye a través del mismo espacio seguido de un flujo frío en forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes. La superficie, que alternativamente recibe y luego libera la energía térmica, juega un rol muy importante en este dispositivo.
- ♦ **Intercambiadores de tipo abierto:** en estos dispositivos las corrientes de entrada fluyen hacia una cámara abierta en la cual ocurre una mezcla física completa de las corrientes.
- ♦ **Intercambiadores de tipo cerrado o recuperadores:** en estos dispositivos las corrientes entre las que ocurre la transferencia de calor no se mezclan o no tienen contacto entre sí. Las mismas están separadas entre sí por una pared de tubo, o por cualquier otra superficie. En consecuencia, la transferencia de calor ocurre por la convección desde el fluido más caliente a la superficie sólida, por conducción a través del sólido y luego por convección desde la superficie sólida al fluido más frío.

Otra manera de clasificar estos dispositivos es según la distribución de flujos:

- ♦ **Flujos en paralelo (o en co-corriente):** los fluidos caliente y frío entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen a través de él en la misma dirección y salen por el otro extremo.
- ♦ **Flujos en contracorriente:** los fluidos caliente y frío entran por los extremos opuestos del intercambiador y fluyen en direcciones opuestas. Se mueven en paralelo pero en sentido opuesto.
- ♦ **Flujos cruzados:** un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro, es decir, las direcciones de flujo son mutuamente perpendiculares.

Generalmente, se considera su estructura como otro criterio de clasificación, siendo posible mencionar los siguientes tipos de intercambiadores:

- ♦ **Intercambiador de doble tubo:** igualmente conocido como intercambiador de tubos concéntricos, está formado por uno o más tubos pequeños contenidos en un tubo de diámetro grande. Por el tubo interno circula uno de los fluidos (frío) mientras que el otro (el fluido caliente) circula por el anillo exterior, para minimizar la pérdida de calor sin necesidad de aislamiento adicional (Figura 5.1).

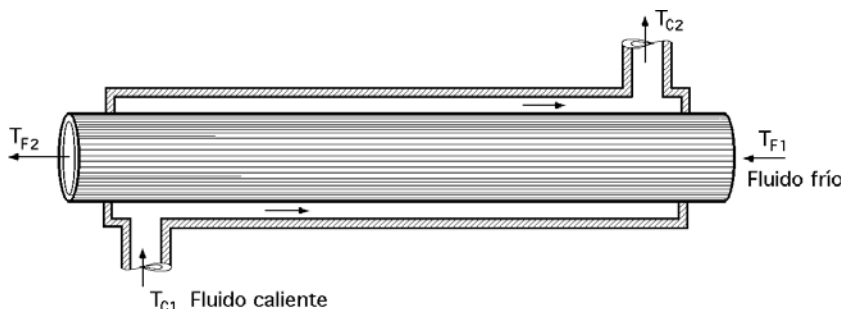


Figura 5.1: Intercambiador de calor de doble tubo

Este tipo de intercambiador no es adecuado cuando el gasto másico es elevado. Si se utilizan varios tubos concéntricos en paralelo, el peso del material de los tubos que se necesita se haría tan grande, que es mucho más económico el construirlos formando un conjunto de carcasa y tubos, de forma que se utiliza una carcasa común para muchos tubos.

- ♦ **Intercambiador de placas:** está provisto de placas metálicas, generalmente con superficies acanaladas, que se disponen sobre un armazón (Figura 5.2). Los

fluidos caliente y frío fluyen entre parejas de placas que se alternan, permitiendo un excelente intercambio de calor. Este tipo de dispositivo suele ser de uso industrial, debido, en parte, por tener mayor coeficiente de transferencia de calor respecto del intercambiador de tubos concéntricos. Esta característica permite que su tamaño sea compacto y su estructura asegura un fácil mantenimiento.

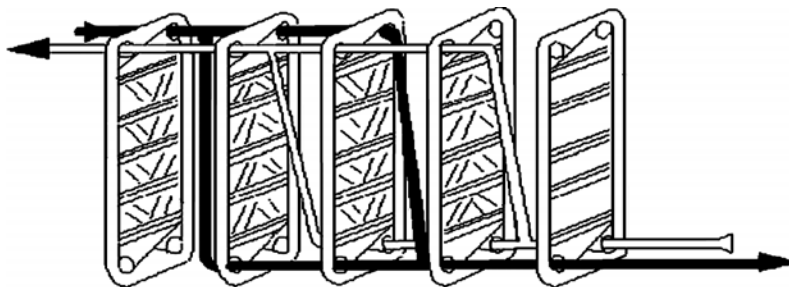


Figura 5.2: Intercambiador de calor de placas

- ♦ **Intercambiador de tubos y carcasa:** es el modelo más ampliamente utilizado en las aplicaciones industriales a todo nivel, especialmente en la industria de alimentos y la industria química. En este dispositivo el fluido caliente que circula por la carcasa, alrededor de los tubos, transfiere el calor al fluido más frío a través de las paredes de los tubos. El fluido frío circula por los tubos y se retira del intercambiador a una temperatura superior a la que entró.

Dependiendo del número de pasos de cada fluido por los tubos y la carcasa, estos intercambiadores se subdividen en: cambiadores de paso simple (1-1), de paso múltiple (1-2) y cambiadores de paso (2-4).

El **intercambiador de paso simple** (1-1) funciona con flujos en paralelo. Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos, mientras que el otro fluido se ve forzado a circular entre la carcasa y la parte exterior de los tubos. El flujo es cruzado o en contracorriente (Figura 5.3).

En el **intercambiador de paso múltiple** (1-2) el fluido del lado de la carcasa fluye en un paso mientras que el del lado de los tubos (el fluido frío) lo hace en dos pasos, lo cual se logra colocando una placa longitudinal al intercambiador (Figura 5.4). Los flujos son parcialmente en contracorriente y parcialmente en corrientes paralelas. En este diseño la transferencia de calor es mayor que en el diseño de paso simple.

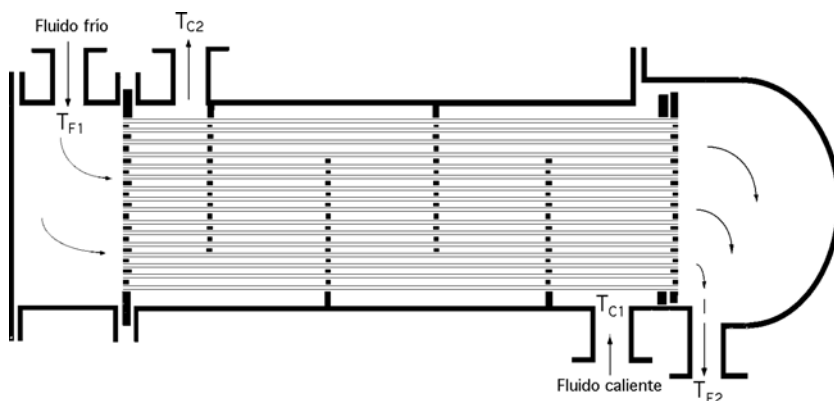


Figura 5.3: Intercambiador de carcasa y tubos de paso simple (1-1)

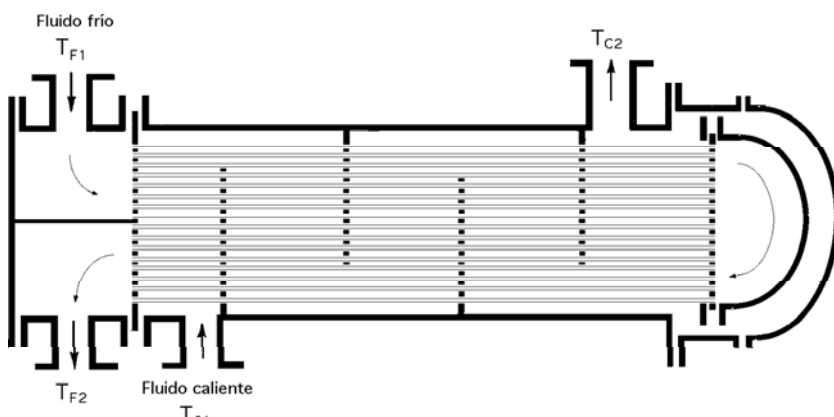


Figura 5.4: Intercambiador de carcasa y tubos de paso múltiple (1-2)

El **intercambiador de calor (2-4)** es similar al (1-2), pero se le incorpora una placa longitudinal para conseguir dos pasos del lado de la carcasa y cuatro pasos del lado del tubo, con el propósito de obtener una mayor velocidad de flujo así como mayor coeficiente global de transmisión de calor. El paso más caliente del fluido de la carcasa está en contacto térmico con los dos pasos más calientes del lado de los tubos y el paso más frío del lado de la carcasa lo está con los dos pasos más fríos del lado de los tubos (véase la figura 5.5).

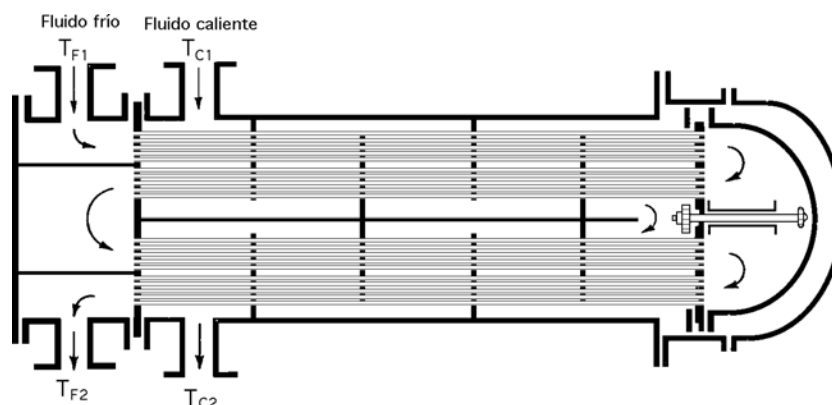


Figura 5.5: Intercambiador de carcasa y tubos (2-4)

5.1.2 Los generadores de vapor o calderas

Entre las aplicaciones más comunes en la industria de los intercambiadores de calor están las calderas o generadores de vapor.

Los generadores de vapor son instalaciones industriales que, aplicando el calor de algún combustible sólido, líquido o gaseoso, calientan y evaporan el agua para diversas aplicaciones en la industria, entre otras funciones, para generar vapor a altas presiones, o agua muy caliente, que sirve para accionar turbinas o calentar otros fluidos. La instalación comprende, además de la caldera, otros componentes necesarios para generar el vapor de manera eficiente, como los quemadores de combustible y los alimentadores de aire, los condensadores, las bombas y tanques de alimentación del fluido, las chimeneas, los sobrecalentadores y recalentadores.

En la caldera propiamente dicha se produce el calentamiento, la evaporación y posiblemente el recalentamiento y sobrecalentamiento del vapor. Estos cambios implican un costo energético (requieren de energía en forma de calor) que es aportado por la energía de la combustión del combustible utilizado.

Las calderas se clasifican fundamentalmente, según el paso de fluidos, en humotubulares o acuotubulares, de las cuales se hace mención más adelante. Sin embargo, también se suele hacer distinción entre las calderas cuyo movimiento de agua es por circulación natural o por circulación forzada, y según la presión a la que operan en la planta, en subcríticas (por debajo de la presión crítica del fluido, e.g. 540 °C y 180 bar) y supercríticas (por arriba de la presión crítica del fluido, e.g. 540 °C y 260 bar).

Las calderas primitivas consistían en un gran recipiente lleno de agua que era calentado por un fuego en su parte inferior. El gran volumen de agua en estado de ebullición generaba fácilmente situaciones de gran riesgo al excederse la presión máxima admisible. Para aumentar la superficie de contacto gas combustible-metal, y disminuir la cantidad de agua en ebullición se crearon primero las calderas humotubulares, en las que los gases de combustión circulan por tubos inmersos en el agua. El próximo paso en el desarrollo fue la creación de las calderas acuotubulares, en las que el agua circula por tubos que forman las paredes del hogar. De este modo se maximiza la transferencia de calor y se minimiza el volumen de agua reduciendo el riesgo de explosión.¹⁸

Las **calderas humotubulares** son calderas de pequeño tamaño, que suelen utilizarse para producir agua caliente para calefacción y otros procesos en la industria alimentaria y agrícola, aunque hay algunos diseños que producen vapor de relativamente baja presión (hasta 12 bar). Las hay de uno o varios pasos de los gases de combustión por los tubos, así como de distintas configuraciones (e.g. con fondo y/o piso húmedo o refractario, compactas y verticales) (Figura 5.6).

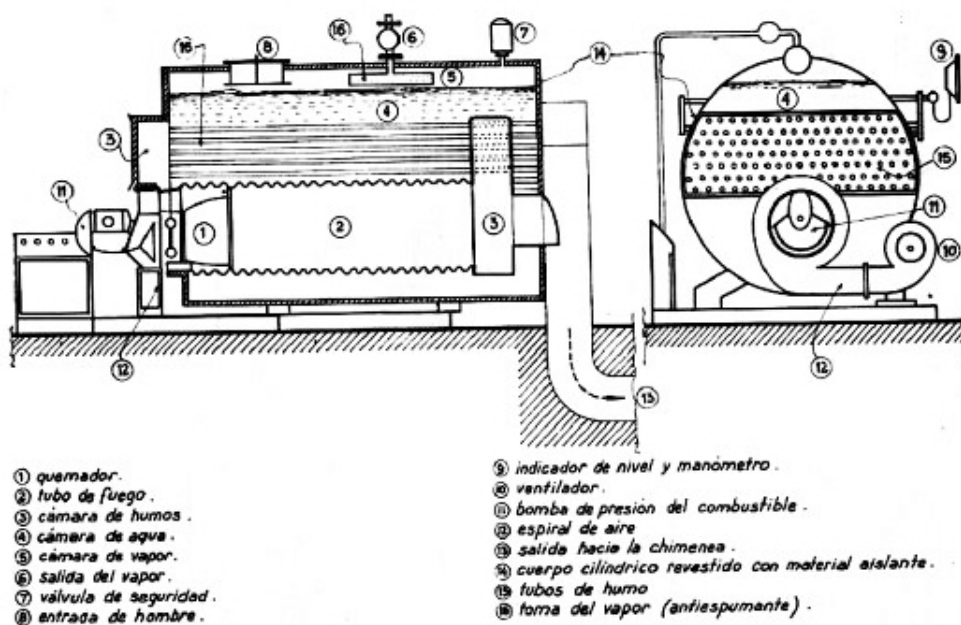


Figura 5.6: Caldera humotubular de un paso

¹⁸ Brizuela, E. (s.f.) *Turbomáquinas*. Extraído el 08.08.2009 desde Universidad de Buenos Aires, sitio web del Dpto. de Ingeniería Mecánica: <http://materias.fi.uba.ar/6720/unidad11.PDF>

En las **calderas acuotubulares** (el agua a calentar está dentro de los tubos) los tubos de agua se unen y conforman para formar el recinto del hogar, llamado paredes de agua. El hogar posee aberturas para los quemadores y la salida de gases de combustión.

En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura, al salir por la parte más alta, provoque un ingreso natural del agua más fría por la parte más baja. El agua en ebullición se acumula en un recipiente llamado domo donde se separa el vapor del agua (Figura 5.7).¹⁹

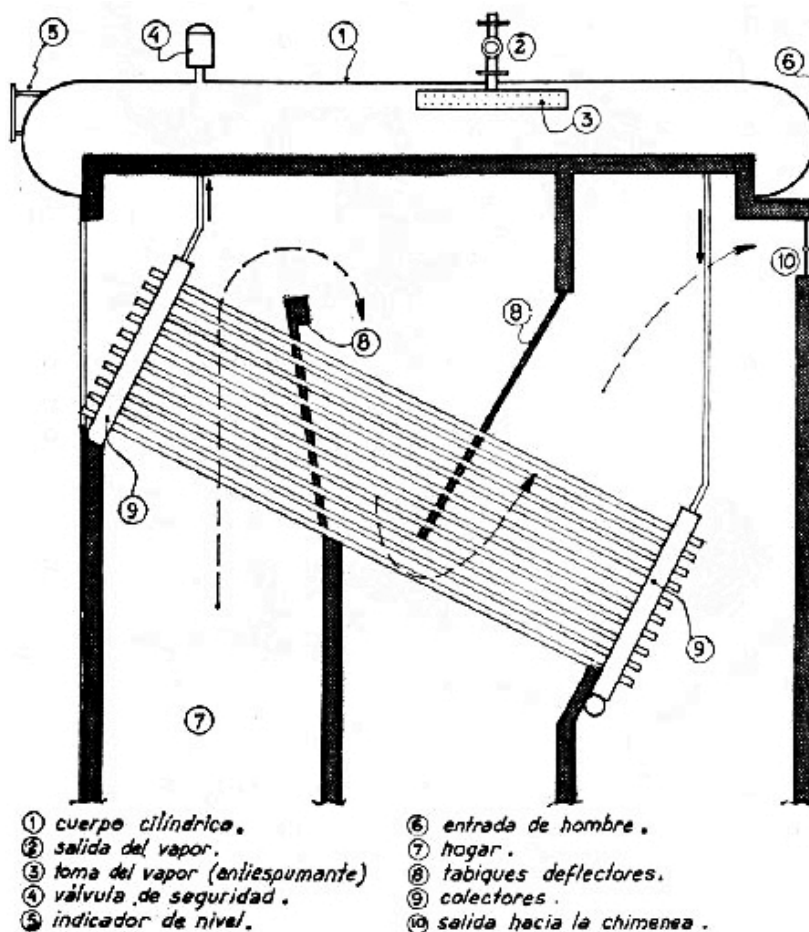


Figura 5.7: Caldera acuotubular de 2 pasos de humos y circulación natural

¹⁹ Ídem

Este tipo de caldera es esencialmente económico por la ausencia de las bombas de líquido, aunque esto causa una baja producción de vapor por la baja velocidad de circulación del agua. Sin embargo, se puede regular la producción del vapor de agua dependiendo de la correspondencia que exista entre la presión y la temperatura del proceso. A cualquier temperatura, por baja que esta sea, se puede vaporizar agua, con tal que se disminuya convenientemente la presión a que se encuentre sometido dicho líquido, y también a cualquier presión puede ser vaporizada el agua, con tal que se aumente convenientemente su temperatura.

Para obtener mayores caudales de vapor y mayores presiones se utilizan bombas de alimentación de agua y bombas de recirculación en los tubos evaporadores, pudiendo operarse incluso por encima del punto crítico de la campana de vapor (a una presión mayor de 21.7 MPa ó 220 atm). Un esquema de caldera de circulación asistida (empleando bomba de alimentación) y de paso forzado se ilustra en la figura 5.8 (caldera de tipo Benson).

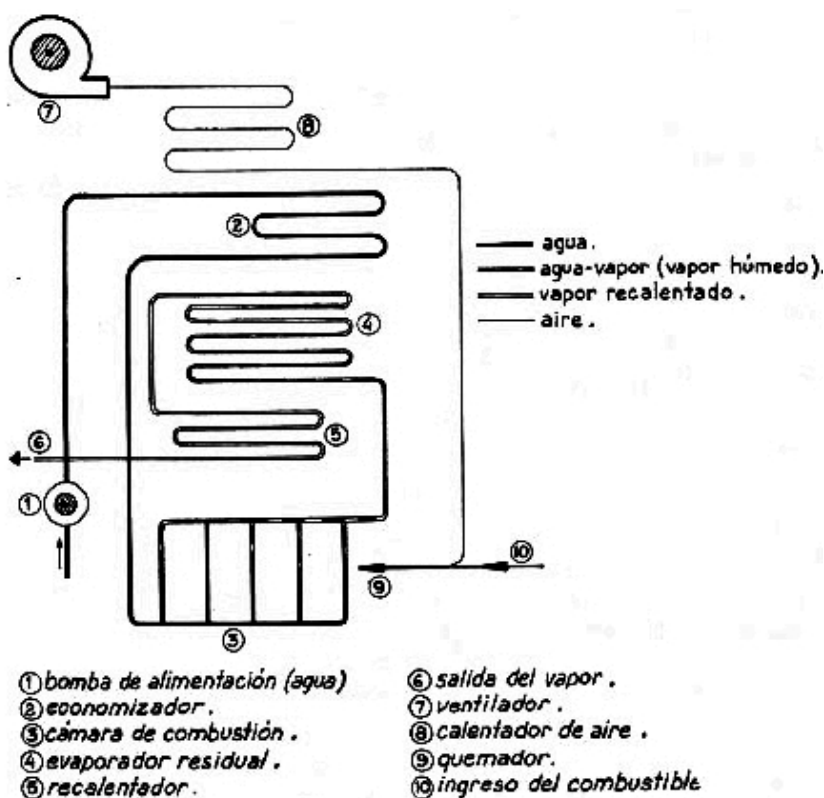


Figura 5.8: Caldera de tipo Benson

5.1.3 Los condensadores térmicos

Los condensadores térmicos son una aplicación especial de los intercambiadores de calor, a fin de licuar vapores removiendo sus calores latentes. Cierta fluido que recorre el intercambiador cambia a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio, denominado refrigerante. Dado que la temperatura del refrigerante aumenta al absorber el calor del fluido condensado, estas unidades actúan a la vez como calentadores, aunque es la función de condensación la que realmente importa.

La condensación se puede producir bien utilizando aire, mediante el uso de un ventilador, o con agua (esta última suele ser en circuito cerrado con torre de refrigeración, en un río o el mar). La condensación sirve para condensar un vapor, después de realizar un trabajo termodinámico (e.g. el vapor de escape de una turbina de vapor o para condensar el vapor comprimido de un compresor de frío en un circuito frigorífico). En los circuitos de aire acondicionado es común seguir enfriando el líquido condensado con el objeto de obtener un líquido subenfriado.

En los automóviles, por ejemplo, se utiliza un sistema de refrigeración (radiador del motor, condensador, evaporador y compresor) que trabaja en dos etapas. La primera etapa, implica intercambio de calor entre el motor del vehículo y un líquido refrigerante que sirve a mantener la temperatura del motor en el rango apropiado. El fluido sale en fase gaseosa y a alta temperatura. La segunda etapa, consiste en condensar y enfriar el fluido refrigerante que ha pasado por el motor con aire proveniente de los electroventiladores y de la ventilación inducida por el movimiento propio del vehículo (esto ocurre en el condensador). En cualquiera de estos casos, lo que se hace es un balance de energía (con un balance de materia previo) entre el fluido que cede calor y el que lo absorbe.

Los condensadores térmicos se utilizan en aplicaciones tan variadas como plantas de fuerza de vapor, plantas de procesos químicos y plantas eléctricas nucleares para vehículos espaciales. La estructura típica de un condensador industrial para vapores de turbina se muestra en la figura 5.9, junto con un dispositivo eyector de gases no condensables.²⁰

Los condensadores pueden ser de superficie y de mezcla. El tipo más común es el **condensador de superficie**, o condensador de lazo cerrado, que puede ser de equicorriente, contracorriente o de flujos cruzados. Estos dispositivos tienen la ventaja de que parte del

²⁰ Ídem

condensado se recircula a la caldera por medio del sistema de alimentación. Su estructura consta de una carcasa y de tubos internos. El agua fría circula por tubos y el vapor por el exterior de los tubos, para asegurar mayor área de transmisión de calor.

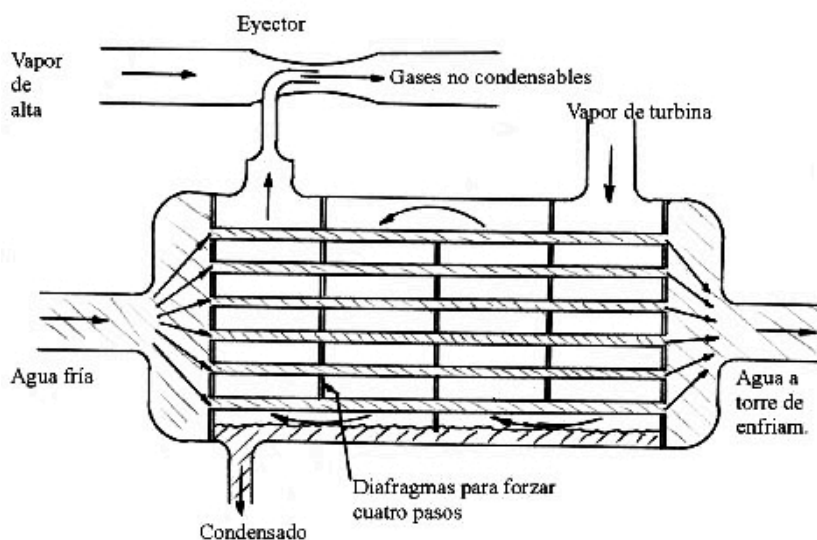


Figura 5.9: Condensador térmico con eyector de gases

El diseño busca minimizar las pérdidas de carga debidas al paso del vapor y aprovechar el intercambio entre el líquido ya condensado y el vapor. Parte del vapor puede utilizarse para volver a calentar el condensado a la salida, creando así un poco de regeneración (el agua que retorna a la caldera productora de vapor está menos fría que lo estaba al condensar). En la figura 5.10 se ilustra un esquema general de este tipo de condensadores. Obsérvese que los tubos de agua están más próximos a medida que el vapor se va enfriando y condensando.

En los **condensadores de mezcla**, o condensadores abiertos, entre los cuales se encuentran los de chorro y los barométricos, el vapor se condensa por contacto directo con el agua fría. Al recinto del dispositivo se introduce vapor y se aspira agua fría por efecto del vacío imperante en el mismo (el vacío es generado por el eyector de gases) con lo cual se ponen en contacto ambos fluidos produciéndose la condensación del vapor (Figura 5.11). Los gases no condensables (aire) se retiran a través del eyector de vapores, en una primera etapa, y luego mediante una bomba mecánica al vacío. La condensación puede mejorarse pulverizando el agua fría (Figura 5.12).²¹

²¹ Ídem

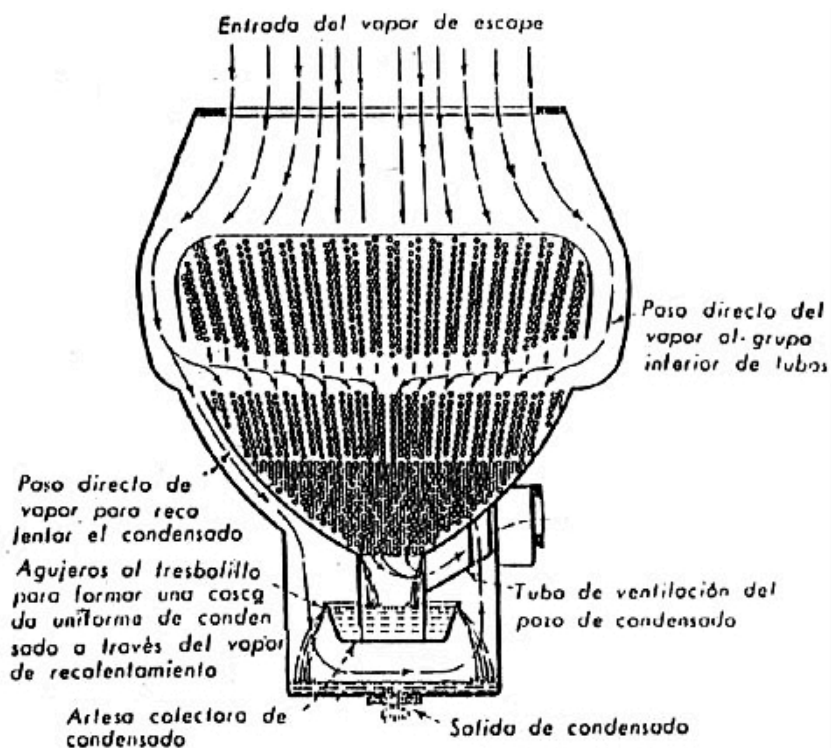


Figura 5.10: Condensador de superficie con regeneración

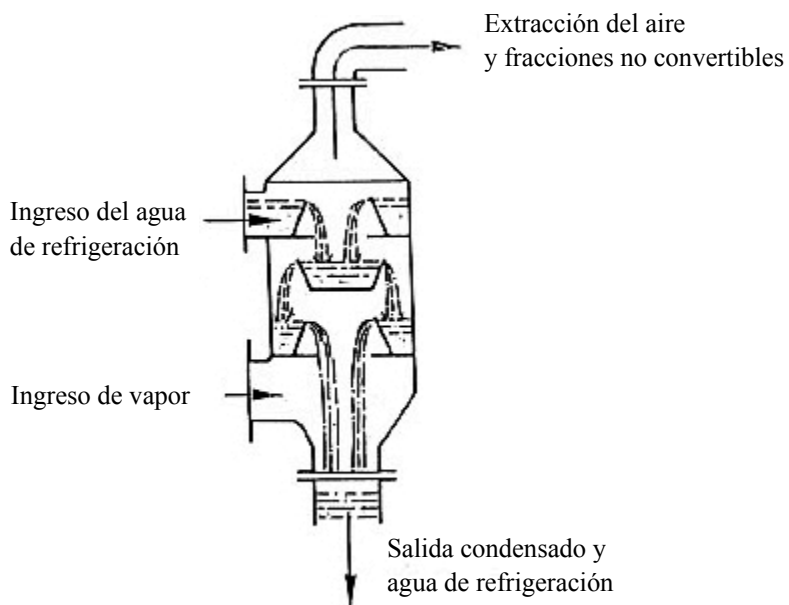


Figura 5.11: Condensador de mezcla (tipo cascada)

Estos condensadores pueden ser apropiados cuando, aparte de la turbina, el vapor está destinado a otros usos que hacen necesario reponer una cantidad sustancial de agua. Igualmente, son ideales cuando hay abundante agua fría de buena calidad disponible (arroyos de montaña).

En los condensadores de mezcla barométricos se aprovecha el peso propio de la columna de agua para mantener el vacío en el recinto de mezcla.

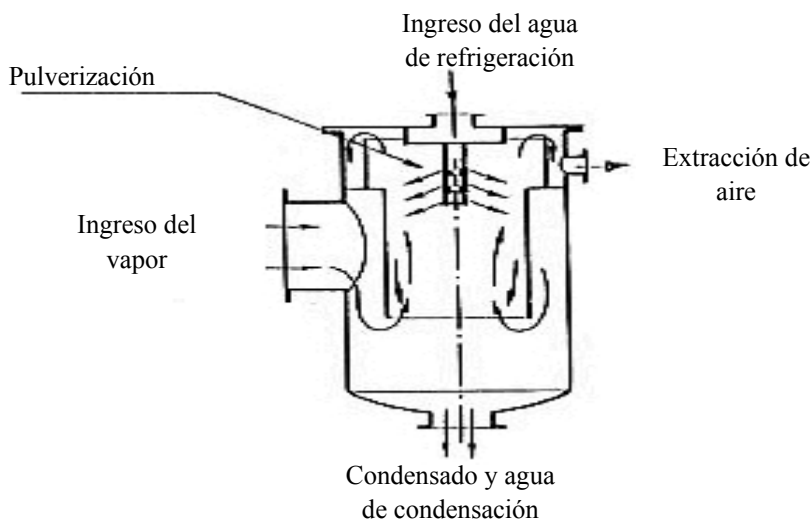


Figura 5.12: Condensador de mezcla (por pulverización)

5.1.4 Las torres de enfriamiento

Una torre de refrigeración es una instalación que extrae calor del agua para desecharlo en la atmósfera, mediante evaporación o conducción. El enfriamiento de una corriente de agua se logra por vaporización parcial de esta con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente de una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo aparato.

Las industrias utilizan agua de refrigeración para varios procesos. Como resultado, existen distintos tipos de torres de enfriamiento. Existen torres de enfriamiento para la producción de agua de proceso que solo se puede utilizar una vez, antes de su descarga en el agua de un río, un lago o en el océano. También hay torres de enfriamiento de agua que puede reutilizarse en el proceso.

Cuando el agua es reutilizada, se bombea a través de la instalación en la torre de enfriamiento. Después de que el agua se enfría, se reintroduce como agua de proceso. El

agua a enfriar generalmente tiene temperaturas entre 40 y 60 °C. Al introducirse en la torre y ser parte del proceso de enfriamiento, se logra una disminución en la temperatura de 10 a 20°C. Adicionalmente, parte del agua se evapora, causando la emisión de más calor. Por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de refrigeración.

El armazón y el empaque interno de las torres pueden ser de madera de pino (previamente tratada con fungicidas) o de plástico (polipropileno moldeado en forma de enrejado). El entablado de los costados de la torre es de pino, poliéster reforzado con vidrio, o cemento de asbesto.

Los tipos más comunes son las torres de enfriamiento por convección natural y por convección forzada.

Torres de enfriamiento por convección natural

En la torre de enfriamiento por convección natural el agua se pulveriza directamente en la corriente de aire que se mueve a través de la torre de enfriamiento por convección térmica. Al caer, las gotas de agua se enfrían tanto por convección ordinaria como por evaporación.

Entre éstas se encuentran las torres de enfriamiento denominadas **atmosféricas** en las que el movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de las boquillas de aspersión. Suelen ser utilizadas en pequeñas instalaciones donde el flujo de agua a enfriar es bajo. Su principal desventaja es que depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire (Figura 5.13).

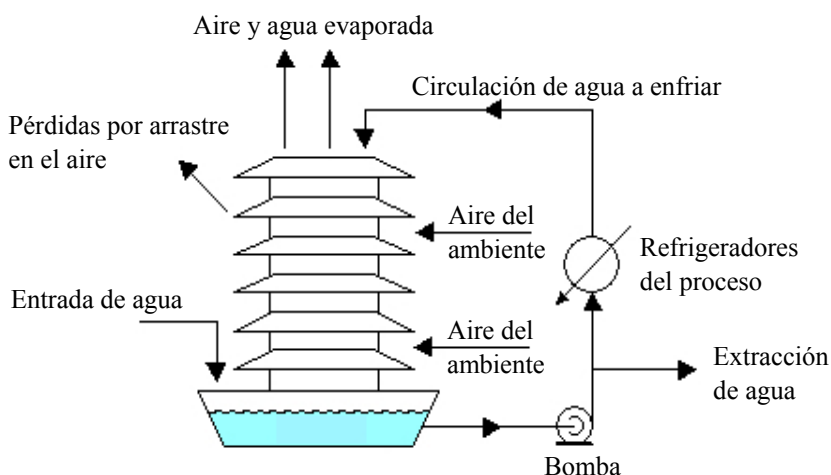


Figura 5.13: Torre de enfriamiento por convección natural²²

²² Diagrama modificado a partir de: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/CoolingTower.png>

También están las torres de enfriamiento de **tiro natural**, donde el flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades entre el aire más frío del exterior y el aire húmedo del interior de la torre. En consecuencia, utilizan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado. Debido al inmenso tamaño de estas torres (aproximadamente 500 pies de alto y unos 400 pies de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 200000 gpm, siendo ampliamente utilizadas en las centrales térmicas (Figura 5.14).



Figura 5.14: Torre de enfriamiento de una central térmica²³

Torres de enfriamiento por convección forzada o de tiro mecánico

En una torre de enfriamiento por convección forzada se pulveriza el agua en una corriente de aire producida por un ventilador, el cual lo hace circular a través de la torre. El ventilador puede estar montado en la parte superior de la torre aspirando así el aire hacia arriba. A este diseño se le denomina torre de **tiro inducido** y son las más utilizadas al asegurar una mejor distribución interna del aire.

También puede ubicarse el ventilador en la base por fuerza de la torre obligando al aire a que fluya directamente hacia dentro, circulando por ductos laterales que terminan

²³ Imagen tomada de: http://www.sxc.hu/pic/m/l/le/leosynapse/303087_cooling_tower.jpg

descargándolo por la parte superior de la torre. Este diseño recibe el nombre de **torre de tiro forzado**.

Es más común encontrar torres de enfriamiento con flujos cruzados que con flujos a contracorriente. En el diseño con flujos cruzados el aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por el tope (Figura 5.15).

Cuando se trata de flujos a contracorriente la corriente de aire seco y frío se mueve desde el fondo hacia el tope de la torre, en sentido contrario al flujo de agua que cae. Para asegurar una buena corriente de aire es necesario invertir en equipos adicionales que elevan el costo del proceso. En comparación, las torres de flujo cruzado aunque requieren más aire tienen un costo de operación más bajo que las torres a contracorriente.

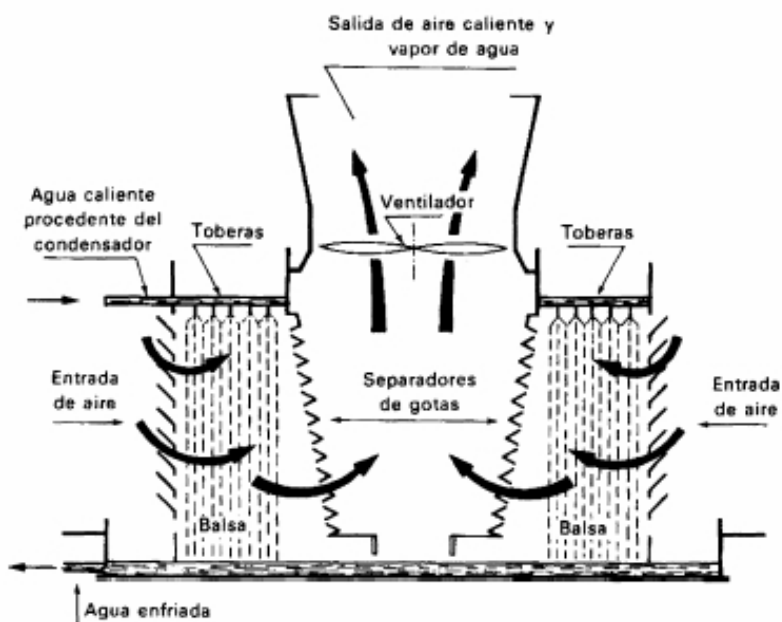


Figura 5.15: Torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado

5.2 Hornos industriales

Cuando se necesita un servicio de calefacción a alta temperatura, o que proporcione un alto flujo de calor, es habitual acudir a los hornos. Un horno es un dispositivo en el que se puede alcanzar temperaturas mucho más elevadas que con un intercambiador de calor de carcasa y

tubos, por ejemplo. El mismo debe mantener dicha temperatura durante el tiempo que dure el proceso, por lo cual requiere de materiales especiales que no permitan pérdidas significativas de calor hacia el entorno (materiales refractarios que soportan altas temperaturas y son aislantes). Algunos hornos utilizan resistencias eléctricas para generar calor aunque los más comunes calientan mediante la producción de llama (combustión).

Existen diferentes diseños de hornos, en función de las necesidades caloríficas, del tipo de combustible y de la manera de introducir el aire para la combustión. En algunas ocasiones, el horno también desempeña la función de un reactor (al proporcionar el calor de reacción necesario).

A pesar de esta aparente diversidad, los hornos de proceso guardan una serie de características en común. En el recinto u hogar del mismo, el mecanismo principal de transferencia de energía es la radiación, desde el seno de la llama hacia los tubos colocados en las paredes. También se suele aprovechar la entalpía de los humos de combustión en una cámara posterior a la cámara de combustión, donde el mecanismo principal de transferencia de calor es el de convección.

Todos los procesos de combustión trabajan con un exceso de aire u oxígeno para asegurar que la combustión sea completa. Una combustión incompleta, además de generar gases altamente contaminantes, malgasta el combustible y aumenta los costos de operación y mantenimiento del equipo.

Para asegurar una combustión completa normalmente se emplea un exceso de aire entre el 5 y el 20%, dependiendo del combustible, del diseño de los quemadores y del horno. Al reducir el exceso de aire, la temperatura teórica de llama (temperatura que se alcanza cuando la combustión se realiza sin pérdidas ni ganancias de calor) aumenta. Como consecuencia de ello, disminuyen las pérdidas y se aumenta la eficiencia térmica del horno, manteniendo por supuesto el calor aportado al proceso. Otra manera de aumentar la temperatura teórica de llama es precalentando el aire antes de inyectarlo a los quemadores; de nuevo, las pérdidas de energía son menores.

Aunque una mayor temperatura teórica de llama disminuye las pérdidas (y por tanto, el consumo de combustible), puede dar lugar a la formación de óxidos de nitrógeno, cuya emisión está muy restringida por la legislación medioambiental.

5.2.1 Los hornos eléctricos

Los hornos eléctricos, a pesar de ser más costosos que los hornos de combustión, presentan ciertas ventajas sobre los últimos que les hace muy útiles en gran cantidad de procesos, sobretodo en la fusión de metales. Las ventajas más resaltantes son:

- ♦ La posibilidad de obtener temperaturas muy elevadas, hasta de 3500 °C (dependiendo del diseño).
- ♦ La facilidad de regular automáticamente la temperatura así como la velocidad de cambio de la misma, dentro de rangos bien precisos de valores.
- ♦ La carga no se ve contaminada con los gases de la combustión (pues no hay combustión). Por lo tanto, se mantiene la pureza del material fundido.
- ♦ Los hornos eléctricos pueden instalarse en espacios reducidos, producen menos desperdicios en el entorno y son más higiénicos que los otros tipos de hornos.
- ♦ Puede controlarse perfectamente la atmósfera en contacto con la masa fundida, haciéndola oxidante o reductora a voluntad, e incluso en algún tipo de horno puede operarse en vacío.

La figura 5.16 ilustra un diagrama sencillo de un horno eléctrico de crisol, que utiliza bobinas de inducción para calentar y fundir el material. Este diseño es empleado en la fundición de pequeñas cantidades (30 ó 40 ton por día) de metal (e.g. acero o hierro fundido).

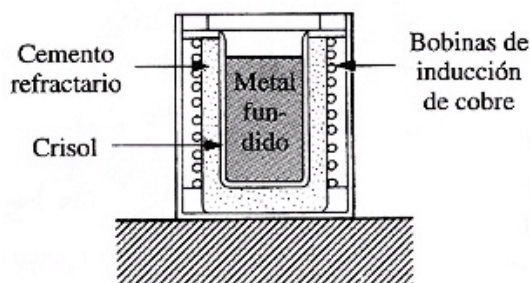


Figura 5.16: Horno eléctrico de crisol²⁴

La figura 5.17 muestra diagramas de hornos eléctricos de arco. Este tipo de horno está formado por una cuba de chapa de acero revestida de material refractario, provista de electrodos de grafito o de carbón amorfo. Los electrodos de carbón amorfo se forman en el

²⁴ Imagen tomada de: <http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d12.htm>

mismo horno, llenando las camisas que llevan los portaelectrodos de una mezcla formada por antracita, coque metalúrgico, coque de petróleo y grafito amasados con alquitrán.

Los hornos de arco trabajan a tensiones comprendidas entre 125 y 500 voltios. Casi todos son basculantes, a fin de facilitar el proceso de colada. Se emplean principalmente para la fusión de acero, fundición de hierro, latones, bronce, aleaciones de níquel y demás.

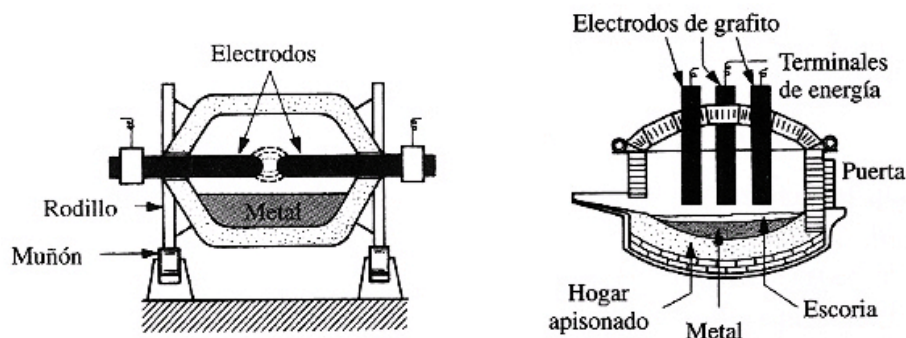


Figura 5.17: Hornos eléctricos de arco²⁵

5.2.2 Los hornos de combustión

Los hornos de llama se basan en la reacción de combustión que se lleva a cabo en los quemadores. Estas reacciones son exotérmicas por lo que al quemar el combustible se genera el calor que se transmite al material a calentar.

Los combustibles que se usan en la industria pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos. Los gases combustibles son, por lo general, subproductos de la destilación y procesamiento de crudo. El gas de refinería contiene en su mayor parte hidrocarburos saturados como el metano, etano, y demás; también contienen olefinas (etileno, propileno, otros) y el resto es hidrógeno molecular. Es bastante común encontrar hornos donde el gas combustible es el gas natural, compuesto principalmente por metano, aunque su poder calorífico es inferior al del gas de refinería.

Los combustibles líquidos (fuel oil), residuos de la destilación atmosférica o al vacío, son empleados en refinerías de petróleo preparados adecuadamente con un producto agregado (generalmente, diesel). Su poder calorífico es similar al del gas combustible, aunque requieren una buena atomización para mejorar el contacto con el aire. La llama

²⁵ Ídem

producida es mucho más sucia que la de los combustibles gaseosos y requieren de mayor exceso de aire.

Los combustibles sólidos no son muy utilizados en la actualidad, pues el rendimiento típico de la combustión no supera el 65%. Generalmente, es el carbón mineral el que se emplea en este campo. El poder calorífico del mismo dependerá de su composición química, densidad, dureza, humedad, y otras propiedades.

Algunos hornos de combustión funcionan solamente a radiación. En este tipo de hornos no hay contacto entre el combustible y los gases de combustión generados por el quemador que calienta el crisol (Figura 5.18). Aunque exista una buena entrada de aire al sistema, en este tipo de horno el combustible tiende a coquizar.

El sistema de transmisión de calor más habitual es por radiación y convección. En la figura 5.19 se muestra este sistema. La transmisión de calor de la bóveda radiante del horno se complementa con la convección producida por los gases de combustión generada por el quemador.

Los hornos de llama son especialmente útiles en la fabricación de cerámica, destrucción de residuos industriales, fabricación de cemento, industria metalúrgica (fundición), industria alimentaria, y otras. Aunque generan más residuos que los hornos eléctricos, son de costo más bajo.

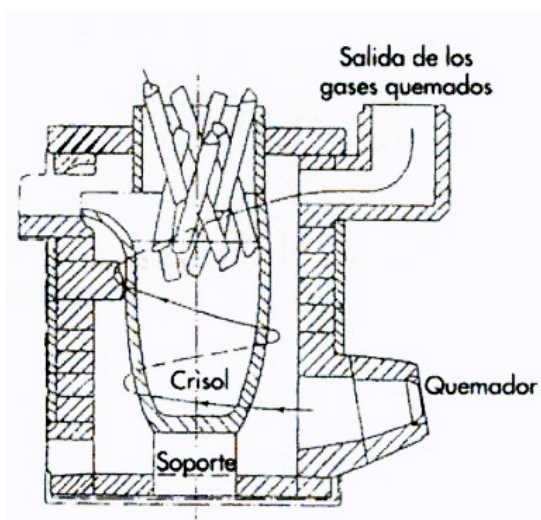


Figura 5.18: Horno de combustión por radiación²⁶

²⁶ Imagen tomada del libro de X.E. Castells, *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*, 1º Ed., 2005, p. 207.

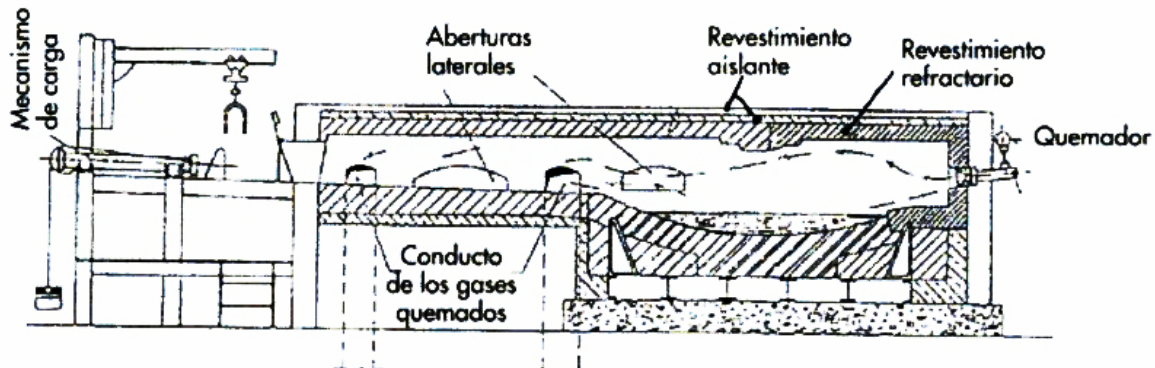


Figura 5.19: Horno de combustión por radiación y convección²⁷

5.3 Ejercicios resueltos

En este capítulo se han mencionado algunos procesos basados en transferencia de calor, que están muy presentes en la industria. Los ejercicios de ejemplo aquí planteados y resueltos tratan de ilustrar, de la manera más simple, cómo abordar el análisis de este tipo de procesos haciendo los respectivos balances de materia y de energía. Muchos aspectos quedan sin ser considerados, pues dependen del proceso específico en estudio y requieren de un nivel más elevado de conocimientos que no es dado en este texto.

Los ejemplos 4.7, 4.8 y 4.9 ponen de manifiesto el procedimiento de análisis y resolución de problemas sencillos donde interviene una unidad de enfriamiento, un intercambiador de calor y una caldera, respectivamente. En general, y una vez planteado el balance de materia, hay que estudiar el balance de energía entre dos sistemas o más, donde uno de los sistemas se calienta (enfría), mientras otro se enfría (calienta).

Ejemplo 5.1: Se desea calentar un crudo proveniente de una refinería en un horno de combustión. El crudo entra al horno a razón de 1400 kg/min, a una temperatura de 180°C, y se debe llevar a 330°C. Su capacidad calorífica es igual a 2,01 kJ/(kg·°C). El combustible utilizado para la combustión es gas propano, con un exceso de oxígeno del 20% mol. El mismo es alimentado a 25°C. La presión del proceso es 1 atm. Los gases salen del horno a 1000°C.

²⁷ Ídem

- (a) Asumiendo que el aire se alimenta a 25°C y que, además, la eficiencia térmica del horno es del 100%, ¿cuántos kilogramos de combustible se requieren para calentar el crudo?
- (b) Para las mismas condiciones anteriores, pero suponiendo que la eficiencia térmica del horno es del 78%, ¿cuántos kilogramos de combustible se requieren para calentar el crudo?
- (c) Si el aire alimentado para la combustión es precalentado a 427°C y el horno es 100% eficiente, ¿cuántos kilogramos de combustible se requieren para calentar el crudo?
- (d) El costo por kilogramo de combustible consumido es \$0,035. Si el horno opera 8000 horas al año, ¿cuánto dinero se ahorra en combustible precalentando el aire, respecto del proceso que no utiliza aire precalentado?

Solución: En este ejemplo se dispone de un horno que utiliza la combustión del propano (sistema I) para generar calor que es transmitido al crudo (sistema II), con el objeto de elevar su temperatura. El crudo entra al horno a razón de 1400 kg/min.

Para resolver el problema se establece como base de tiempo 1 minuto. El diagrama inicial del proceso de combustión se muestra en la figura 5.20.

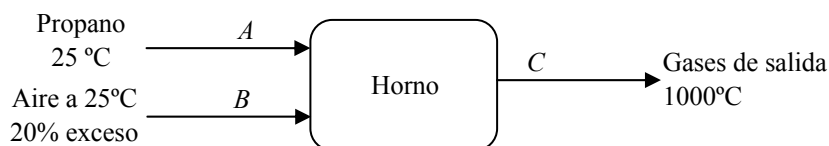
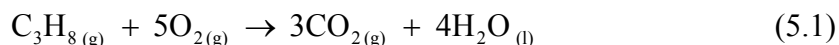


Figura 5.20: Horno de combustión para calentar crudo (Ej. 5.1)

Parte (a). Para determinar los kilogramos de combustible utilizados es necesario determinar, primero, la cantidad de energía requerida para calentar el crudo (sistema II) de 180 a 330°C. Luego, se plantean los balances de materia y de energía asociados al proceso de combustión (sistema I) para calcular la cantidad de energía generada por la combustión del propano. Luego, el calor generado por el sistema I debe ser transmitido al sistema II en su totalidad pues la eficiencia es del 100%.

$$Q_{\text{requerido}} = m_{\text{crudo}} \times C_{p \text{ crudo}} \times \Delta T = 1400 \text{ kg} \times 2,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (330 - 180)^\circ\text{C} = 422100 \text{ kJ}.$$

La reacción de combustión del propano viene dada por la ecuación (5.1). No se sabe qué cantidad de propano es necesaria para generar el calor requerido para calentar el crudo. Por ello, se utilizará una variable, n , cuya unidad es gmol.



Balance de materia:

Moles que entran de propano: $A = n \text{ gmol C}_3\text{H}_8$.

Moles que entran de oxígeno: $B x_{B,O_2} = n \times \frac{5}{1} \times \frac{(100+20)\%}{100\%} = 6n \text{ gmol O}_2$.

Moles que entran de nitrógeno:

$$B x_{B,N_2} = n \times \frac{5}{1} \times \frac{(100+20)\%}{100\%} \times \frac{0,79}{0,21} = 22,571n \text{ gmol N}_2.$$

Moles que se forman de CO₂: $C x_{C,CO_2} = n \times \frac{3}{1} = 3n \text{ gmol CO}_2$.

Moles que se forman de H₂O: $C x_{C,H_2O} = n \times \frac{4}{1} = 4n \text{ gmol H}_2\text{O}$.

Moles que salen de O₂: $C x_{C,O_2} = 6n - n \times \frac{5}{1} = n \text{ gmol O}_2$.

Moles que salen de N₂: $C x_{C,N_2} = 22,571n - 0 = 22,571n \text{ gmol N}_2$.

Balance de energía:

La ecuación de balance de energía se reduce a $Q = \Delta H$, donde Q es el calor generado por la combustión del propano. La entalpía se calcula a través de las expresiones (4.50) y (4.51).

Los valores utilizados para las entalpías de formación y las capacidades caloríficas son los siguientes:

$$\Delta \hat{H}_f^\circ \text{CO}_2 = -94046,5 \text{ cal/gmol} \quad \Delta \hat{H}_f^\circ \text{H}_2\text{O(l)} = -68315,8 \text{ cal/gmol}$$

$$\Delta \hat{H}_f^\circ \text{C}_3\text{H}_8 = -24808,2 \text{ cal/gmol} \quad C_{p,C_3H_8} = 0,369 \text{ cal/(g}^\circ\text{C)} \quad C_{p,CO_2} = 0,199 \text{ cal/(g}^\circ\text{C)}$$

$$C_{p,H_2O} = 1,00 \text{ cal/(g}^\circ\text{C)} \quad C_{p,O_2} = 0,218 \text{ cal/(g}^\circ\text{C)} \quad C_{p,N_2} = 0,248 \text{ cal/(g}^\circ\text{C)}.$$

El cálculo de las entalpías se escribe como:

$$\begin{aligned} Q = \Delta H &= [3n \times (-94046,5 + 44,01 \times 0,199 \times (1000 - 25)) + 4n \times (-68315,8 + 18,016 \times 1,00 \times \dots \\ &\dots(1000 - 25)) + n \times (0 + 32,00 \times 0,218 \times (1000 - 25)) + 22,571n \times (0 + 28,02 \times 0,248 \times \dots \\ &\dots(1000 - 25))] - [n \times (-24808,2 + 44,09 \times 0,369 \times (25 - 25)) + 6n \times (0 + 32,00 \times 0,218 \times \dots \\ &\dots(25 - 25)) + 22,571n \times (0 + 28,02 \times 0,248 \times (25 - 25))] \\ &= -274989n \text{ cal}. \end{aligned}$$

Seguidamente, se plantea que:

$$-Q_{\text{combustión}} = Q_{\text{requerido}} \Rightarrow +274989n \text{ [cal]} = 422100 \times 1000 \times 0,239 \text{ [cal]} = 100,882 \times 10^6 \text{ cal}.$$

Despejando la variable n , se tiene que:

$$n = \frac{100,882 \times 10^6 \text{ cal}}{274989 \text{ cal/gmol}} = 366,858 \text{ gmol C}_3\text{H}_8 \equiv 16,175 \text{ kg C}_3\text{H}_8.$$

Parte (b). Si la eficiencia térmica del horno es del 78% significa que solo el 78% del calor generado por la combustión del propano es transmitido al crudo, pues el restante 22% se pierde (por transmisión de calor al entorno, presencia de residuos en los quemadores, u otros). Por lo tanto, es lógico pensar que debe quemarse más cantidad de combustible a fin de obtener la misma cantidad de calor requerido por el crudo.

La eficiencia η se define como:

$$\eta = \frac{\text{Energía entregada} - \text{Pérdidas}}{\text{Energía entregada}} \times 100\% = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía entregada}} \times 100\%. \quad (5.2)$$

Siendo $\eta = 78\%$, y la energía aprovechada el calor requerido para calentar el crudo, $Q_{\text{requerido}}$, la energía que el horno deberá entregar es:

$$\text{Energía entregada} = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\eta} \times 100\% = Q_{\text{requerido}} \times \frac{100\%}{\eta} = Q_{\text{requerido}} \times \frac{100\%}{78\%}.$$

Ahora se tiene que:

$$\begin{aligned} -Q_{\text{combustión}} &= Q_{\text{requerido}} \times \frac{100\%}{78\%} \\ +274989n \text{ [cal]} &= 422100 \times 1000 \times 0,239 \times \frac{100\%}{78\%} \text{ [cal]} = 100,882 \times 10^6 \times \frac{100\%}{78\%} \text{ [cal]} \end{aligned}$$

$$n = \frac{100,882 \times 10^6 \text{ cal}}{274989 \text{ cal/gmol}} \times \frac{100\%}{78\%} = 470,331 \text{ gmol C}_3\text{H}_8 \equiv 20,737 \text{ kg C}_3\text{H}_8.$$

Parte (c). En este caso, se considera que el aire es precalentado a 427°C antes de ser inyectado a los quemadores del horno para hacer la combustión. La eficiencia térmica del horno se considera igual al 100%. El balance de materia es el mismo de la parte (a), pero hay algunos cambios en el planteamiento del balance de energía, pues el oxígeno y el nitrógeno de la entrada están a 427°C en vez de 25°C. Esto es:

$$\begin{aligned} Q = \Delta H &= [3n \times (-94046,5 + 44,01 \times 0,199 \times (1000 - 25)) + 4n \times (-68315,8 + 18,016 \times 1,00 \times \dots \\ &\dots(1000 - 25)) + n \times (0 + 32,00 \times 0,218 \times (1000 - 25)) + 22,571n \times (0 + 28,02 \times 0,248 \times \dots \\ &\dots(1000 - 25))] - [n \times (-24808,2 + 44,09 \times 0,369 \times (25 - 25)) + 6n \times (0 + 32,00 \times 0,218 \times \dots \\ &\dots(427 - 25)) + 22,571n \times (0 + 28,02 \times 0,248 \times (427 - 25))] \\ &= -354866,8n \text{ cal}. \end{aligned}$$

Luego:

$$-Q_{\text{combustión}} = Q_{\text{requerido}}$$

$$+ 354866,8n \text{ [cal]} = 422100 \times 1000 \times 0,239 \text{ [cal]} = 100,882 \times 10^6 \text{ cal,}$$

de donde se obtiene el valor de la variable n :

$$n = \frac{100,882 \times 10^6 \text{ cal}}{354866,8 \text{ cal/gmol}} = 284,28 \text{ gmol C}_3\text{H}_8 \equiv 12,534 \text{ kg C}_3\text{H}_8.$$

Este valor significa que se logra un ahorro de aproximadamente el 22% de combustible por cada minuto que el horno se mantiene en operación, si se precalienta el aire a la temperatura establecida. Este procedimiento es habitual en la industria pues es claro que disminuye los costos de proceso.

Parte (d). El costo de un kilogramo de propano es \$0,035. El ahorro en cantidad de combustible, por minuto de operación del horno, con aire sin precalentar respecto de la operación con aire precalentado, es:

$$\text{Ahorro en combustible} = 16,175 - 12,534 \text{ [kg]} = 3,641 \text{ kg.}$$

El ahorro anual en cantidad de combustible es:

$$\text{Ahorro anual en combustible} = 3,641 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \times \frac{8000 \text{ horas}}{1 \text{ año}} = 174,768 \times 10^4 \text{ kg/año.}$$

Esto significa que los costos de proceso disminuyen en la siguiente cantidad de dinero:

$$\text{Dinero ahorrado anualmente} = 174,768 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \times \frac{\$0,035}{\text{kg}} = \$61168,8.$$

Ejemplo 5.2: De una turbina sale vapor de agua saturado a una presión de 1 atm. Este vapor tiene una entalpía de vaporización de 2256,9 kJ/kg. El flujo másico de vapor proveniente de la turbina es de 340 kg/min, y entra a un condensador para ser condensado utilizando como fluido refrigerante agua fría. El agua fría entra a 22°C y debe salir a una temperatura inferior o igual a 50°C. Calcular la cantidad de agua que debe ser empleada para lograr la condensación del vapor de agua saturado. Asuma que la eficiencia térmica del condensador es idealmente del 100%.

Solución: El diagrama de la figura 5.21 muestra el proceso habitual para producir energía utilizando ciclos de vapor. Este ciclo involucra una caldera que produce vapor de agua para

mover una turbina, el vapor proveniente de la turbina se condensa y se bombea en parte a la caldera.

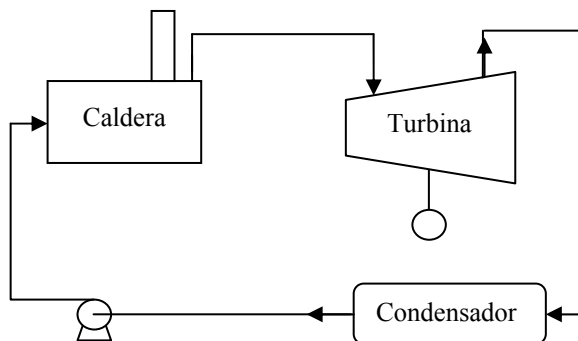


Figura 5.21: Diagrama de un ciclo de vapor (Ej. 5.2)

Lo que se hace para recircular el vapor de agua proveniente de la turbina es condensarlo. El vapor entra al condensador a 100°C (vapor saturado) y supóngase que sale a la misma temperatura. Solo se cambia el estado de agregación del compuesto, mas no su temperatura (mientras el agua que va a la caldera esté más caliente es mejor).

La energía necesaria para condensar un kilogramo de vapor de agua saturado es de 2256,9 kJ. Ahora bien, se obtiene que la energía necesaria para condensar 340 kg de vapor de agua por minuto es:

$$\begin{aligned} Q_{\text{condensación}} &= 340 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times 2256,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 767346 \text{ kJ/min} \\ &= 767346 \times 0,239 \text{ cal/min} = 183,396 \times 10^6 \text{ cal/min.} \end{aligned}$$

Esta cantidad de energía debe ser extraída o absorbida por el agua refrigerante. Pero, la temperatura máxima que puede alcanzar el agua de salida en el condensador es de 50°C . En consecuencia:

$$\begin{aligned} Q_{\text{condensación}} &= Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} \times C_{p \text{ agua}} \times \Delta T \\ 183,396 \times 10^6 \text{ cal/min} &= m_{\text{agua}} \times 1,00 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}} \times (50 - 22)^{\circ}\text{C} = 28,0 m_{\text{agua}} \text{ cal/g.} \end{aligned}$$

Despejando la masa de agua refrigerante, se obtiene que:

$$m_{\text{agua}} = \frac{183,396 \times 10^6 \text{ cal/min}}{28,0 \text{ cal/g}} = 654,986 \times 10^4 \text{ g/min} \equiv 6549,86 \text{ kg/min.}$$

Ejemplo 5.3: Se han de calentar 150000 kg/h de un crudo de petróleo desde 20°C hasta 80°C por intercambio de calor con el producto de cola de una columna de destilación. El producto de cola, con una velocidad de flujo de masa de 100000 kg/h, entra a 150°C. Las capacidades caloríficas de crudo de petróleo y del producto de cola son 8,32 y 9,21 BTU/(lb.°F), respectivamente. Determinar la temperatura a la que sale del intercambiador el producto de cola.

Solución: Este ejemplo trata de un intercambiador de calor clásico, como el mostrado en la figura 5.22, donde el producto de cola (sistema I) transmite energía en forma de calor al crudo de petróleo (sistema II), que absorbe esta energía y eleva su temperatura.

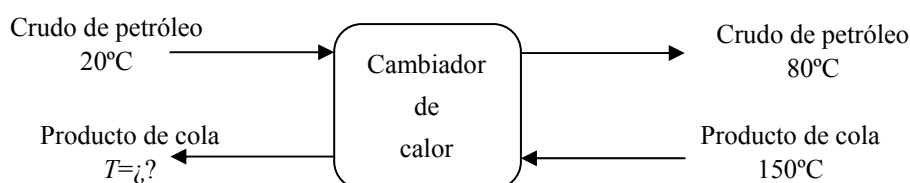


Figura 5.22: Intercambiador de calor (Ej. 5.3)

Tómese como base de tiempo una hora. La ecuación que se plantea es:

$$Q_{\text{crudo}} = -Q_{\text{producto de cola}}$$

$$m_{\text{crudo}} \times C_{p \text{ crudo}} \times \Delta T_{\text{crudo}} = -m_{\text{producto de cola}} \times C_{p \text{ producto de cola}} \times \Delta T_{\text{producto de cola}}$$

$$150000 \text{ kg} \times \frac{1,00 \text{ lb}}{0,4536 \text{ kg}} \times 8,32 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times [(32 + 1,8 \times 80) - (32 + 1,8 \times 20)]^\circ\text{F} = \dots$$

$$\dots = -100000 \text{ kg} \times \frac{1,00 \text{ lb}}{0,4536 \text{ kg}} \times 9,21 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times [(32 + 1,8 \times T) - (32 + 1,8 \times 150)]^\circ\text{F}.$$

Despejando la temperatura de salida T , se obtiene que:

$$T = \frac{297,143 \times 10^6 \text{ BTU} - 613,188 \times 10^6 \text{ BTU} + 649,735 \times 10^5 \text{ BTU}}{-365,476 \times 10^4 \text{ BTU}/^\circ\text{F}} = 68,70^\circ\text{F} \equiv 20,39^\circ\text{C}.$$

5.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se trataron algunos procesos basados en transferencia de calor, como los intercambiadores de calor (e.g. calderas, condensadores, torres de enfriamiento) y los hornos. Se explicó el principio termodinámico que permite a cada uno de estos procesos llevar a cabo los intercambios de energía. Se mostraron algunos tipos o diseños más comunes en la industria, mencionando algunas de sus características más importantes.

Finalmente, se ilustró con algunos ejemplos numéricos sencillos la manera de analizar las condiciones materiales y energéticas en este tipo de procesos. El objetivo de los ejemplos ha sido el de adaptar la información dada en los capítulos anteriores a problemas de transferencia de calor.

5.5 Lecturas recomendadas

Se recomienda al lector leer los capítulos mencionados de los siguientes libros, así como revisar ciertos problemas resueltos y propuestos en dichos capítulos a fin de ejercitarse en los temas estudiados:

Felder R, y Rousseau R.W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*, 3^o Edición, Limusa Wiley, México. Secciones de capítulos: 7.5, 7.6, 8.3 y 8.4.

Himmelblau D.M. (1997). *Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química*, 6^o Edición, Prentice Hall Hispanoamericana, México. Sección de capítulo: 5.3.

El lector también puede recurrir a los capítulos iniciales de cualquier libro de transferencia de calor, como por ejemplo: Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L. y Lavine A.S., *Fundamentos de transferencia de calor*, Wiley, 2007; o también: Kreith, F. y Bohn, M.S., *Principles of Heat Transfer*, Thomson, 2001.