

# Capítulo 12

## EQUIPOS AUXILIARES DE CALDERA Y EQUIPO EXTERNO DE TRATAMIENTO DE AGUA

---

La extensión y alcance de los equipos auxiliares de planta se determinan por el tipo y tamaño de la planta (calefacción, proceso o generación de energía), el tipo de combustible utilizado y las disposiciones medioambientales de regulación de descarga al aire o al suelo. El tipo más común de equipo auxiliar que un operario puede encontrar son bombas, ventiladores, precipitadores, filtros de mangas, calentadores de agua de alimentación, evaporadores, desaireadores, ablandadores de agua y equipos similares de tratamiento de agua.

### ***BOMBAS***

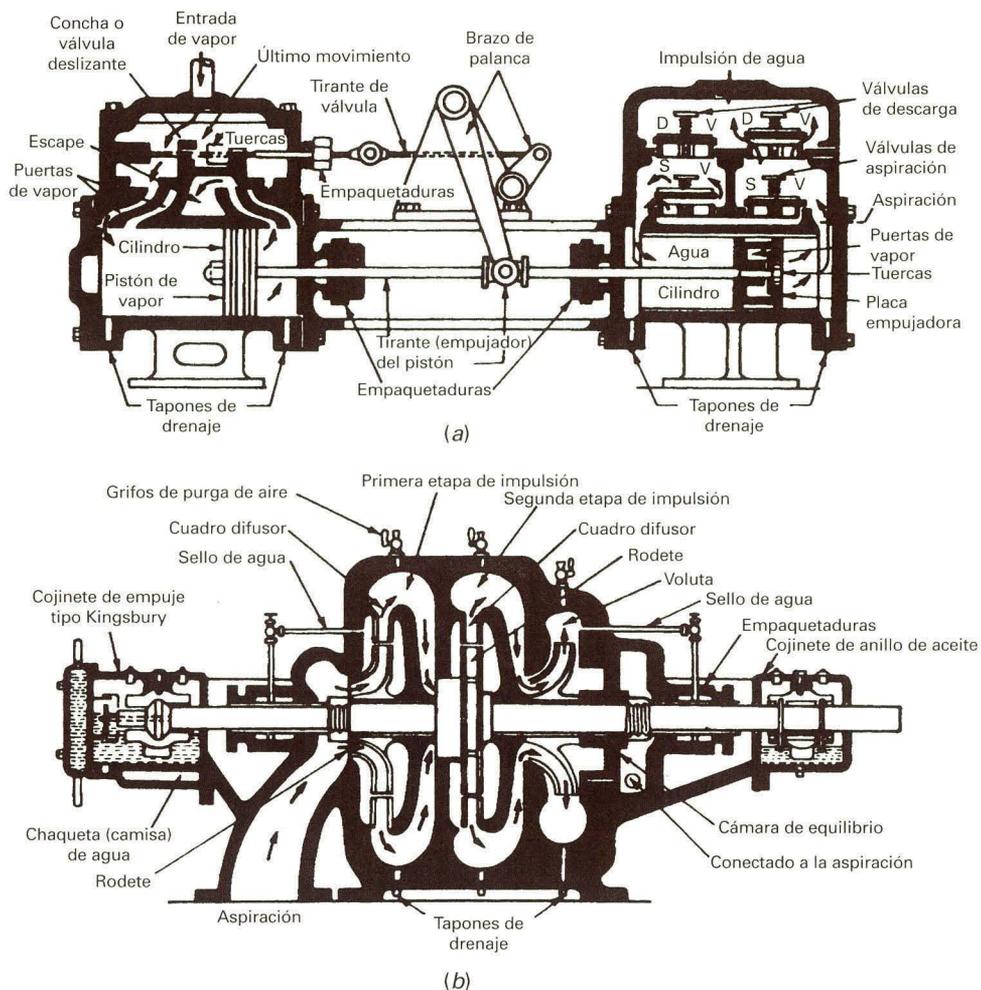
---

Las bombas de agua de alimentación de uso general pueden dividirse en los siguientes tipos: alternativas o recíprocas, rotativas y centrífugas. El tipo alternativo hace uso de un cilindro de agua y un émbolo directamente montado sobre un eje común de un cilindro de vapor acoplado directamente. Uno o dos cilindros de agua (y vapor) en paralelo, conocidos como bombas simples o dúplex, respectivamente son los tipos más normales de bombas de alimentación recíprocas (Fig. 12.1a). Las bombas de alimentación Triplex y Cuadruplex a menudo tienen el émbolo buzo conectado por biela a un cigüeñal de accionamiento mecánico.

***Datos y términos de bombeo.*** Los siguientes datos se aplican a bombas que utilizan agua:

$$1 \text{ psi manométrica (efectiva)} = 2,31 \text{ pies de agua } C a = 0,693 \text{ M C A} = 0,07 \text{ kg/cm}^2$$

$$1 \text{ pie de columna de agua} = 0,434 \text{ psi} = 0,3 \text{ M. C A} = 0,03 \text{ kg/cm}^2$$



**Figura 12.1.** Bombas de alimentación de calderas. (a) Caballito o tipo Dúplex de acción directa del vapor. (b) Centrífuga multietapa.

1 pie cúbico de agua = 62,4 libras en peso = 28,3 kilos = 0,028 metros cúbicos = 28 litros de agua

1 pie cúbico de agua = 7,48 galones americanos = 6,24 galón imperial = 0,028 m<sup>3</sup> = 28 litros

1 galón americano = 1,33 libras en peso

1 galón imperial = 10 libras en peso

1 galón americano = 231 in<sup>3</sup> = 3,785 cm<sup>3</sup> = 3,785 dm<sup>3</sup> = 4,539 litros

1 galón imperial = 277 in<sup>3</sup> = 4,539 dm<sup>3</sup> = 4,539 litros

1 HP = 33.000 ft · lb/min de trabajo = 4.495 kg mts/min = 74,91 kgmt/sg = 75 kgmts/seg

**Altura (o columna) de agua.** La presión del líquido en las aplicaciones de bombeo se considera equivalente a una columna de líquido de una altura equivalente como consecuencia del peso de la columna para producir esta presión equivalente. Por ejemplo, para una columna de agua a la temperatura y la presión atmosférica: 2,31 pies agua (0,7 m) = 1 lb/in<sup>2</sup> de presión (0,707 kg/cm<sup>2</sup>). La *altura estática* es la altura en pies (o metros) de un fluido por encima del punto manométrico. La altura de presión es la altura estática más la presión manométrica expresada en pies (o metros) más la altura de fricción (si el fluido está fluyendo). La *altura de velocidad* es la altura vertical en pies (o metros) requerida para producir una cierta velocidad de flujo, expresada por la ecuación:

$$\text{Altura de velocidad, } h_v = \frac{v^2}{2g}$$

siendo  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  (9,81 m/s<sup>2</sup>) o aceleración de la gravedad (caída libre de un cuerpo a nivel del mar). La altura o presión operativa de bomba (presión diferencial) es la diferencia entre las alturas de presión y de aspiración.

Excepto para velocidades de agua por encima de la media o para grandes volúmenes a presiones bajas, la altura de velocidad a menudo se omite en los cálculos.

La *altura de fricción* (o de pérdida por rozamiento) es la altura o presión de líquido necesaria para vencer la resistencia al flujo de fluido en tubos y accesorios.

**Velocidad.** La velocidad del flujo en la ecuación de la altura de velocidad se expresa en pies/segundo (metros/segundo) y es importante en los cálculos del flujo o caudal. Para determinar el caudal o flujo que pasa por un punto dado, hay que usar:  $Q = A \times v$ , donde  $A$  = área de la sección de paso en pies cuadrados (o metros cuadrados) del tubo o conducto del fluido;  $v$  = velocidad del flujo en pies/segundo (o metros/segundo); y  $Q$  = caudal en pies cúbicos/segundo (m<sup>3</sup>/s). Las alturas de velocidad se calculan de las alturas de presión a ambos lados del tubo de Venturi o placa de orificio instalada en el tubo según la normativa hidráulica. Es posible alguna aproximación para un tubo circular con un diámetro interior  $d$ , en la fórmula:

$$v = \frac{0,4085 \text{ (gpm)}}{d^2}$$

---

**Ejemplo.** Una prueba sobre una tubería de 3" de diámetro interior mostró que la velocidad de flujo fue de 68,08 pies/segundo al medirla por una placa-orificio. ¿Cuál es el caudal en galones por minuto?

$$68,08 = \frac{0,4085 \text{ (gpm)}}{3^2}$$

y resolviendo para gpm:

$$\text{gpm} = \frac{68,08 \times 9}{0,4085} = 1.500 \text{ gpm}$$


---

**Trabajo o energía de bombeo.** La energía o trabajo requerido por una bomba está influido por la altura que el líquido debe alcanzar, la fuerza necesaria para bombearlo dentro de un sistema de mayor presión y la energía necesaria para vencer las pérdidas debidas al rozamiento o fricción. Esta energía o trabajo por unidad de tiempo se llama potencia hidráulica o potencia teórica de bombeo, expresada como sigue:

$$\text{Potencia teórica} = \frac{\text{gpm} \cdot H \cdot s \text{ (lb/gal)}}{33.000}$$

donde: gpm = caudal.

$H$  = altura o presión total, pies (o  $\text{kg/m}^2$ ).

$s$  = gravedad específica del fluido. Para agua = 1.

Para el agua que pesa 8,33 libras/galón a la temperatura ordinaria, la ecuación se convierte en:

$$\text{Potencia teórica} = \frac{\text{gpm} (8,33)H}{33.000} = \frac{\text{gpm} \cdot H}{3.962}$$

La potencia de freno (bhp) es la potencia teórica en HP dividida por la eficiencia o rendimiento de la bomba,  $E$ , o sea:

$$\text{bhp} = \frac{\text{gpm} \cdot H}{3.962 E} ; \text{ Nótese que } E = \frac{\text{Potencia teórica}}{\text{Potencia de freno}}$$

**Ejemplo.** Si una bomba tiene un rendimiento del 70 por 100 y está entregando 1.500 gpm de agua desde el nivel del suelo contra una altura o presión total de 1.000 pies, ¿qué motor se necesitará? Sustituyendo en la ecuación de la potencia de freno:

$$\text{bhp} = \frac{1.500 \cdot 1.000}{3.962 \cdot 0,70} = 541 \text{ HP}$$

**Viscosidad.** La viscosidad es un término usado para indicar la fricción interna de un fluido. En mecánica de fluidos, la viscosidad dinámica se expresa como:

$$\frac{\text{Tensión de cizalladura de un fluido}}{\text{Tasa de tensión de cizalladura}}$$

Otro término utilizado en mecánica de fluidos es el de *viscosidad cinemática*, que es la dinámica (también llamada viscosidad absoluta) dividida por la densidad del fluido. La viscosidad cinemática puede expresarse en pies cuadrados/segundo (o metros cuadrados/segundo), lo que se denomina *stoke*. Como puede verse, la viscosidad es importante en el diseño de bombas y en algunos flujos de fluidos, como los

aceites o crudos de petróleo en los tubos, para determinar la fricción o resistencia interna al flujo. La viscosidad varía considerablemente de un fluido a otro y disminuye con el aumento de la temperatura. Ésta es la razón por la que se calientan los líquidos viscosos cuando se van a bombear de un punto a otro. Los líquidos viscosos requieren mayor potencia para su bombeo y reducen la eficiencia y capacidad de bombeo a causa de la resistencia o fricción interna de sus moléculas.

**Aspiración.** La altura de aspiración total es la lectura del manómetro de la brida de aspiración de la bomba, que se convierte en pies (o metros) al restarle la altura de velocidad en pies (o metros) en ese punto. La altura total de aspiración es la misma que la de elevación excepto por la altura de velocidad que hay que añadir.

Por experiencia, se sabe que las bombas tienen limitaciones de aspiración, aún incluso cuando en teoría deberían elevar un líquido a la altura en pie (o metros) representada por la presión atmosférica:

$$14,7 \text{ de presión atmosférica} = 2,31 \times 14,7 = 34 \text{ pies (10,2 metros)} \\ \text{de aspiración posible.}$$

Los factores que reducen la aspiración posible son la fricción interna o resistencia interna al flujo, la presión de vapor del fluido, velocidad de la bomba, capacidad y diseño interno de la bomba. Tienen lugar vibraciones y una posible cavitación cuando una bomba está tratando de operar con una altura de aspiración que no puede controlar.

### **Bombas alternativas o recíprocas**

Las bombas alternativas o recíprocas son bombas de desplazamiento positivo y pueden usarse para conseguir presiones muy elevadas mediante la acción en serie de varios cilindros o mediante más de una bomba. Al colocarlas en serie, la presión de descarga o impulsión de un cilindro es la presión de aspiración del siguiente, y esto puede hacerse con cada cilindro incrementando la presión hasta obtener la presión resultante que se desee.

**Bombas alternativas o recíprocas de tipo vapor.** Las bombas alternativas o recíprocas de tipo vapor se clasifican como de *acción directa*, si el cilindro motor de vapor está en línea con el cilindro de bombeo (caballito de vapor), o *accionadas por la potencia del vapor*, si el motor de vapor tiene cigüeñal, volante y cruceta deslizando. El término *simplex* significa que tiene un solo cilindro de agua. El término *doble acción* significa que bombea agua por ambos lados del pistón o émbolo buzo (sumergido) de la bomba. Véase la Figura 12.1 para la disposición de la bomba.

Una *bomba dúplex* del tipo de acción directa de vapor tiene dos cilindros de agua cuya operación está coordinada para obtener la presión final deseada. Una bomba dúplex puede también estar accionada por un motor de vapor, cigüeñal, volante y cruceta. Las *bombas triples* tienen tres cilindros de agua en paralelo; pueden estar accionadas por vapor, y son *de acción* directa accionadas por vapor o tienen accionamiento por motor eléctrico.

Las bombas alternativas se accionan también mediante motores eléctricos, diésel, de gas y turbinas de vapor, bien sea por accionamiento directo del eje o por medio de cajas reductoras.

Las bombas alternativas o recíprocas deben llevar *empaquetaduras* para evitar que el agua perdida pase al pistón o émbolo buzo y también por donde el eje sale del cilindro, llamadas empaquetaduras de glande. El material de las empaquetaduras depende del fluido de que se maneja, su temperatura, presión y material de la bomba. Las instrucciones de montaje y mantenimiento del fabricante deberían seguirse escrupulosamente cuando la empaquetadura pide su reemplazo para evitar fugas excesivas. Los filtros deberían instalarse en el lado de aspiración de las bombas alternativas para evitar que sustancias extrañas dañen las válvulas o cilindros. Se utilizan las *válvulas de pie* para las bombas bajo presión de aspiración, para evitar el retroceso en la línea de aspiración. Se utilizan *aspiradores* para drenar o evacuar el aire de las líneas de aspiración y evitar que la bomba llegue a bombear aire fresco. Es una forma de cebar el bombeo estando seguros de que sólo fluye agua a la bomba desde la línea de aspiración.

**Cálculo de la presión del agua.** Una cuestión común acerca de las bombas alternativas de vapor de acción directa es cómo el vapor a baja presión puede producir una descarga de agua a elevada presión de bombeo.

---

**Ejemplo.** Una bomba simplex tiene un cilindro de vapor de 10'' de diámetro trabajando a 100 psi (7 kg/cm<sup>2</sup>) conectado eléctricamente a una bomba de agua de acción simple con un diámetro de 5''. Si se desprecian rendimientos, ¿aproximadamente qué presión de agua se generaría si debe considerarse un 20 por 100 de deslizamiento final en la bomba?

El medio más fácil para resolver esto es comparar la fuerza en el pistón de vapor e igualarla a la fuerza sobre el pistón de agua. Hay que suponer que el diámetro del cilindro es el mismo que el del pistón. Así pues:

Área del pistón de vapor x presión de vapor = área del pistón de agua x presión del agua

$$\text{Área del pistón de vapor} = \frac{\pi(\text{diámetro})^2}{4} = \frac{\pi(10)^2}{4} = 78,54 \text{ in}^2$$

$$\text{Área del pistón de agua} = \frac{\pi(\text{diámetro})^2}{4} = \frac{\pi(5)^2}{4} = 19,64 \text{ in}^2$$

Igualando fuerzas y multiplicando cada área por la presión correspondiente:

$$100 \times 78,54 = \text{Presión del agua} \times 19,64$$

$$\text{Presión del agua} = 400 \text{ psi}$$

De esto hay que deducir el 20 por 100 de 400 psi (28 kg/cm<sup>2</sup>) por deslizamiento de bomba, dando una presión final de agua de: 400 - 80 = 320 psi (22,4 kg/cm<sup>2</sup>).

---

**Cálculo de la potencia.** Otro cálculo que se necesita muy a menudo es la potencia indicada (hpi) que se desarrolla por el cilindro de vapor de la bomba alternativa de

vapor. Se hace referencia a los pies · libra de trabajo por minuto realizados por el pistón en los términos siguientes:

$$A = \text{área o superficie de pistón actuada por el vapor} = \frac{\pi d^2}{4} = 0,7854 d^2$$

donde  $d$  es el diámetro del pistón en pulgadas (cm).

$P$  = presión media efectiva del vapor.

Ésta se determina normalmente por el diagrama del indicador de vapor para obtener la presión media durante la carrera del motor en psi (kg/cm<sup>2</sup>).

$L$  = longitud del desplazamiento a carrera del pistón en pies (cm).

$N$  = número de carreras por minuto.

$$\text{hpi} = \frac{PLAN}{33.000}$$

**Ejemplo.** ¿Cuál es la potencia indicada del cilindro de vapor en el ejemplo previo si la carrera es de 20", la presión media indicada es de 90 psi y el número de carreras por minuto es de 60?

Utilizando la ecuación anterior y sustituyendo los datos conocidos:

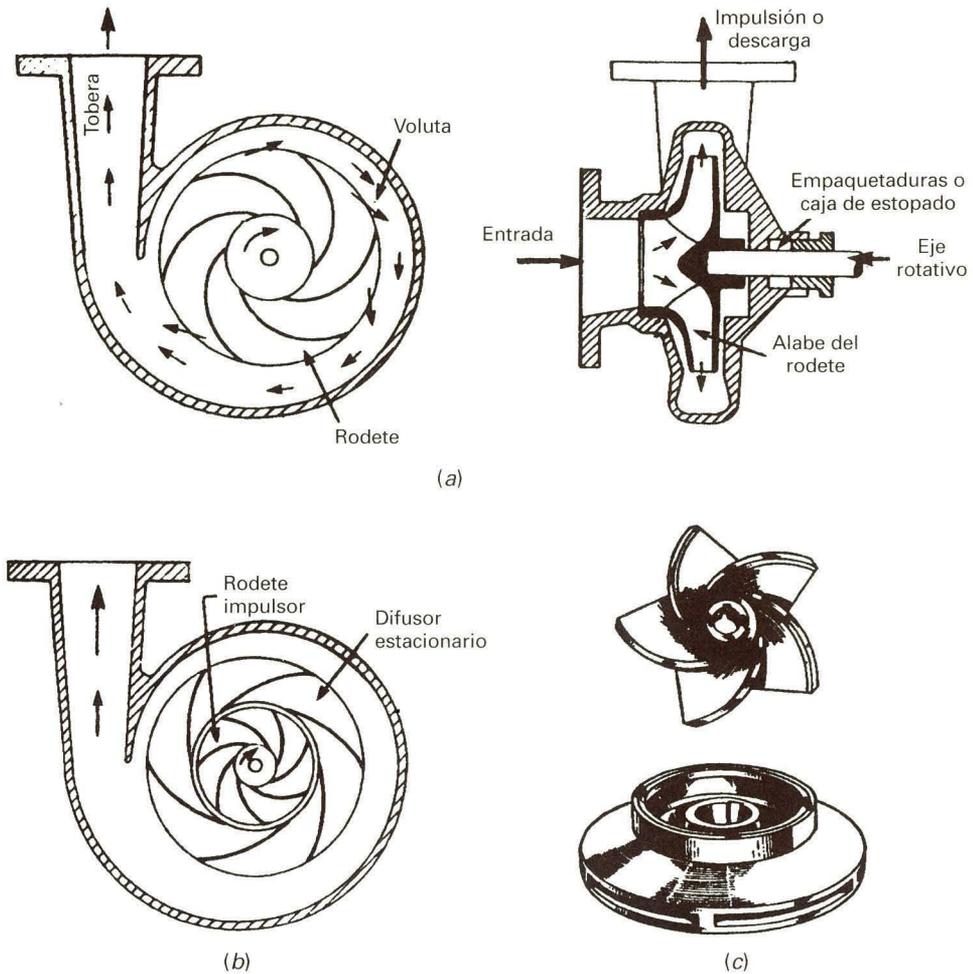
$$\text{hpi} = \frac{90 \times 20/12 \times 78,54 \times 60}{33.000} = 21,42 \text{ HP}$$

En las bombas alternativas de vapor, las dimensiones siempre se dan primero con el diámetro del cilindro de vapor en pulgadas, seguido del diámetro del pistón de agua y después la carrera en pulgadas.

**Válvulas de seguridad para bombas.** Como las bombas alternativas son de desplazamiento positivo, es posible construir unas para alta presión siempre que la válvula de descarga esté cerrada. Además, es esencial tener una válvula de seguridad en la línea de impulsión o descarga antes de ninguna válvula de cierre para evitar que se cree una posible situación de sobrepresión como una descarga en el cabezal o culata de la bomba.

## Bombas centrífugas

Este tipo de bomba tiene su componente principal en una envolvente o casing-corona dentro de la cual un rotor da vueltas (véase la Figura 12.2 de la página siguiente). El fluido a bombear se dirige a través de la tubería de entrada al centro de la bomba, denominado centro de oído por rodete. El rodete dirige el agua radialmente a través de los pasos del rodete y esto desarrolla presión por conversión de la energía cinéti-



**Figura 12.2.** Características de bombas centrífugas. (a) Rodete y casing de bomba centrífuga tipo voluta. (b) Bomba centrífuga tipo difusor y casing envolvente. (c) Rodetes de tipo cerrado y abierto.

ca. Las *volutas* convierten la energía de velocidad en energía de presión. En la bomba de *tipo difusor* o turbina, unos alabes-guía están colocados entre el rodete y la envolvente o casing; pero la transformación de energía de velocidad en presión sigue el diseño de la volutas del casing (véase la Figura 12.2b).

Las bombas centrífugas pueden ser del tipo de aspiración simple o doble. En las de aspiración doble, el fluido entra por ambos lados de la bomba.

Las bombas centrífugas *multi-etapa* (véase la Figura 12.1b) se usan para presiones de servicio no alcanzables por las bombas de una sola etapa, y se encuentran en servicios tales como suministros de agua, incendios, alimentación de calderas y bombas de carga de refinería e industrias petroquímicas. Las bombas de etapa múltiple pueden ser del tipo de voluta o difusor. Las bombas del tipo de voluta (o envol-

vente) normalmente tienen rotores de aspiración simple con la mitad de las entradas del rotor en una dirección y la mitad en dirección opuesta para equilibrar las fuerzas de empuje axiales. En las bombas del tipo de difusor, la entrada del rodete normalmente se enfrenta y coloca en una dirección con la fuerza de empuje axial neutralizada por una disposición de presión diferencial, *pistón de equilibrado* o calderín. La presión diferencial no equilibrada a través de cada rodete crea un empuje axial hacia la aspiración final que está equilibrada por un pistón de equilibrado localizado cerca del final del último rodete al lado final fuera del rotor. Los cojinetes de empuje Kingsbury en el apoyo o cojinete exterior se usan también para absorber cualquier fluctuación originada por funcionamientos anormales.

La bomba centrífuga no se considera como bomba de desplazamiento positivo, como la bomba alternativa o caballito de vapor. Por ejemplo, si la válvula de descarga o impulsión de una bomba centrífuga está totalmente cerrada, la presión sólo alcanzará hasta un valor limitado con el rodete girando batiendo el fluido, siendo convertido en calor el trabajo o energía de bombeo. No habrá una subida de la presión de descarga final de bomba. En cambio, si la válvula de descarga de una bomba alternativa se cierra, la presión continuará aumentando a no ser que un control de presión máxima pare una bomba o una válvula de seguridad abra, o bien la protección de sobrecarga del motor salte y pare la bomba. Si ninguno de los elementos antes citados, trabajo y potencia, es ilimitado, algo tendrá que reventar como consecuencia de la sobrepresión.

Todas las bombas centrífugas están diseñadas para operar con líquidos. Siempre que se forman mezclas de líquido y vapor o aire, pueden esperarse daños para la vida de los elementos rotativos. Si el líquido está a temperatura elevada o el vapor está presente en el agua de alimentación de caldera, puede ocurrir también una destrucción rápida del casing o carcasa envolvente de la bomba. Este daño del casing y/o rodetes se denomina erosión o rayado y se identifica por unos pequeños hoyos u orificios en forma de canales verniculares en el casing, lo que puede permitir al líquido pasar los diafragmas o anillos de desgaste y cierre del casing.

**Cavitación.** La cavitación puede tener lugar en las bombas siempre que la presión del fluido se iguale o equilibra con la presión de vapor a la temperatura existente y como consecuencia se forman burbujas que alternativamente se vaporizan y revientan. La rápida formación de burbujas origina que el líquido a velocidad elevada lleve el vacío con fuerza impactante sobre las partes o piezas internas de la bomba. Estas puntas y fuerzas que surgen en el vacío son equivalentes a explosiones en pequeñas áreas o zonas, pero los esfuerzos originados en las piezas interiores pueden exceder de las tensiones admisibles en esas piezas de la bomba donde se están produciendo. Esto origina que se desprendan partículas metálicas con la consiguiente erosión o «picado» rápido, incluso hasta el punto de que estas piezas se rompen internamente produciendo severos daños a la bomba.

Para evitar la cavitación la mayoría de los fabricantes de bombas graban en sus bombas la *altura de aspiración neta positiva* o NPSH (net positive suction head) que no podrá ser sobrepasada para evitar los daños por cavitación. Se necesita conocer la naturaleza del líquido que se está bombeando y su temperatura correspondiente, ya que la presión del vapor (función de su temperatura) tiene efectos sobre la NPSH. En muchas aplicaciones de centrales eléctricas con calderas, se han destruido bombas

de alimentación debido a los daños causados por cavitación debida a fallos del control de la temperatura del agua de alimentación, con resultado de evaporación instantánea o «flasheado», afectando a la NPSH permisible. Muchas bombas, especialmente las diseñadas para manejar fluidos por encima de las temperaturas atmosféricas, tienen una válvula de *bypass* desde la etapa final de la bomba hasta la zona de aspiración. Este *bypass* se activa si la NPSH permitida se acerca a su valor máximo permitido durante el trabajo de bombeo.

Siempre que se detecte erosión por cavitación debe efectuarse un chequeo inmediato de todo el sistema de aspiración hasta eliminar el origen o fuente del vapor. Éste puede presentarse en el agua a temperatura elevada por varias razones. La NPSH disponible puede ser inadecuada o insuficiente, dando por resultado una cavitación parcial seria en la primera etapa (en el rodete) y formación de algo de vapor libre. La bomba puede ser obligada a trabajar sin caudal, produciéndose una elevación rápida de temperatura al estar la bomba por encima del punto de «flasheado» (o evaporación instantánea) del líquido, a no ser que tenga una línea de *bypass* adecuada con orificio y conducto de conexión abierto (esto también puede producir aplastamiento del elemento rotatorio). La zona de inmersión sobre la entrada en la línea de aspiración puede ser inadecuada o insuficiente, dando lugar a la formación de vórtices y arrastres del vapor o aire.

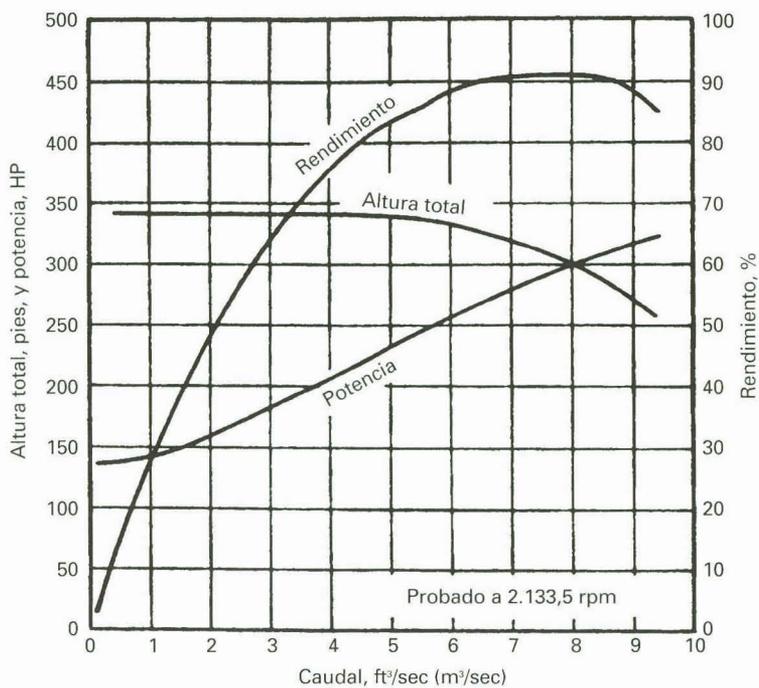
Cuando una bomba multietapa se vuelve vaporizadora, pierde presión o se desceba, se desequilibra y ejerce una carga máxima de empuje sobre el cojinete de empuje axial. Esto normalmente da como resultado un fallo o rotura del cojinete de empuje; si no se detecta inmediatamente, puede arruinar el elemento rotativo o rodete a causa del contacto metal-metal, cuando el rotor roza, con posible agarrotamiento, al menos en algún lugar de la bomba.

Algunos otros *problemas operativos* en las bombas centrífugas son:

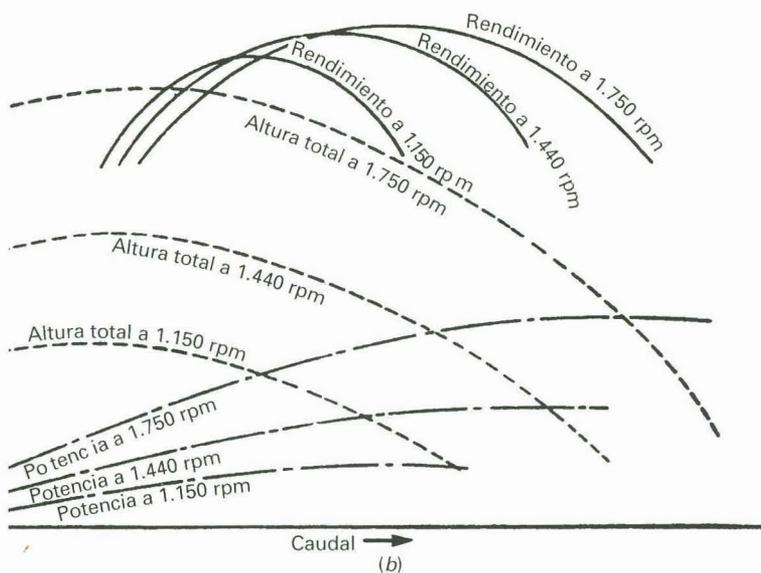
1. Puede producirse un bajo caudal de agua si existe una velocidad inadecuada, filtro de aspiración obstruido, bombeo con aire, válvulas de purga de aire abiertas (deben cerrarse para cebar la bombas), desgaste de los anillos de los cojinetes o rodete dañado.
2. Pueden producirse vibraciones por desalineación, desgaste de los cojinetes, desequilibrio del rodete debido a desgaste y corrosión de piezas de la bomba.
3. El progresivo desgaste del eje y su rotura pueden producirse por una empaquetadura del eje inadecuadamente instalada o un ataque químico sobre el material por el fluido bombeado que puede causar corrosión por tensiones y producir rotura.

**Bombas tipo barrilete.** Las bombas centrífugas tipo barrilete no tienen su casing o envolvente separada en horizontal, sino que consta de una doble caja cilíndrica con acceso a las partes interiores de la bomba a través de cabezales finales removibles. Estas bombas tipo barrilete se utilizan para alimentación de calderas de alta presión de hasta 6.000 psi (420 kg/cm<sup>2</sup>) y 600 °F (315 °C) de temperatura. Para el servicio normal de hasta 2.600 psi (182 kg/cm<sup>2</sup>) la bomba gira a 3.600 rpm y tiene 12 o más etapas.

Las *curvas de rendimiento* de bombas centrífugas se usan para mostrar las relaciones de altura (presión), potencia y rendimiento a varias velocidades. La Figura 12.3a muestra las características de rendimiento de una bomba centrífuga con



(a)



(b)

**Figura 12.3.** Curvas de rendimiento de bombas centrífugas. (a) Características de rendimiento de una bomba centrífuga trabajando a velocidad constante. (b) Características de rendimiento de una bomba centrífuga trabajando a diferentes velocidades.

agua como fluido y operando a velocidad constante. Nótese cómo la presión desarrollada cae después o cerca de su capacidad o caudal de trabajo. El rendimiento sube al 91,7 por 100 y después cae. La Figura 12.3b muestra las curvas de rendimiento de la bomba a diferentes velocidades constantes de prueba. El análisis del comportamiento de una bomba centrífuga puede ser muy complejo cuando uno considera el flujo turbulento dentro de la bomba.

### Leyes de las bombas centrífugas

Las leyes de las bombas centrífugas han sido establecidas para relaciones aproximadas, que son útiles para indicar las tendencias de rendimiento. Las derivaciones y consecuencias de estas leyes de las bombas centrífugas se tratan en los textos de mecánica de fluidos. Para una bomba que trabaja a velocidad constante:

- La presión total varía en relación directa con el cuadrado del diámetro del rodete,  $D^2$ .
- El caudal de la bomba varía en relación directa con el cubo del diámetro del rodete,  $D^3$ .
- La potencia desarrollada por la bomba varía en relación directa con  $D^5$ , siendo  $D$  el diámetro del rodete.

Para una bomba centrífuga funcionando a diferentes velocidades:

- El caudal de la bomba varía en relación directa con la velocidad,  $N$ .
- La presión total varía en relación directa con el cuadrado de la velocidad,  $N^2$ .
- La potencia del fluido desarrollada por la bomba varía directamente con el cubo de la velocidad,  $N^3$ .

---

**Ejemplo de leyes de bombas.** Una bomba centrífuga trabajando a 1.150 rpm produce una altura o presión total de 37,6 ft (11,28 m) y un caudal de 800 gpm (3.028 litros/min = 3,028 m<sup>3</sup>/min). Utilizando las leyes de las bombas, ¿cuál sería la altura (presión) y caudal a 1.750 rpm? Esto implica las relaciones de una bomba a diferentes velocidades. Por proporcionalidad para hallar la altura (presión):

$$\frac{37,6}{(1.150)^2} = \frac{H}{(1.750)^2}$$

$$H = \frac{37,6 \times (1.750)^2}{(1.150)^2} = 87,1 \text{ pies}$$

Para hallar el caudal:

$$\frac{800}{1.150} = \frac{C}{1.750}$$

$$C = \frac{800 \times (1.750)}{1.150} = 1.217,4 \text{ gpm (4.608 l/min)}$$


---

**Los inyectores de vapor como bombas.** Los *inyectores* o *aspiradores* se usan normalmente para alimentar de agua a pequeñas calderas o como medio auxiliar de alimentación mecánica para calderas de tamaño medio. Son muy comunes en las prácticas de las locomotora ferroviarias. Hacen uso de una tobera alargada o *tubo Venturi* para que el vapor pueda alimentar agua contra su propia contrapresión.

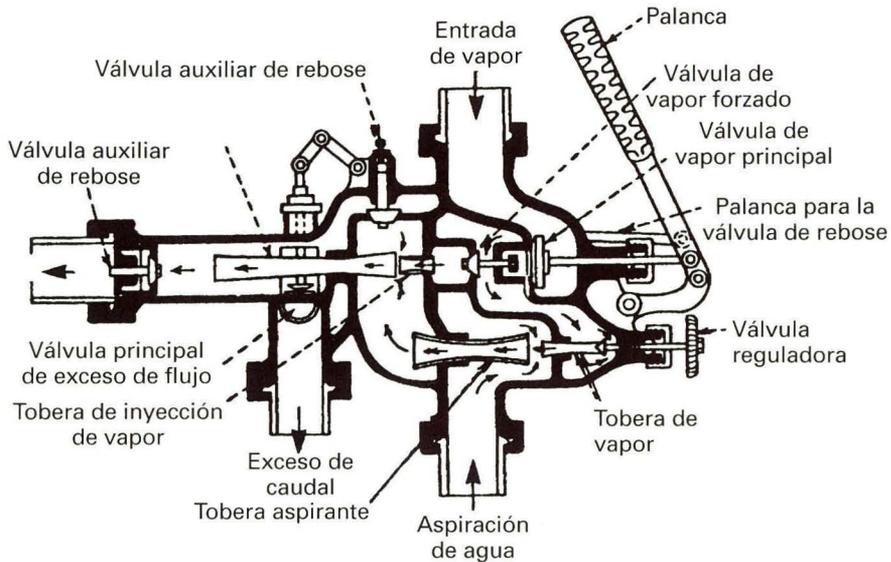
El vapor entra por un final de tubo Venturi en forma de chorro. El vacío producido alrededor del chorro entrante dirige el agua de alimentación a la cámara del chorro en el flujo de vapor. A medida que la mezcla de vapor y agua pasa a través del área de la garganta del tubo Venturi se produce una elevada velocidad de flujo. El peso del agua contenida en esta mezcla de vapor y agua alcanza suficiente cantidad de movimiento para abrir la válvula de control de la tubería de alimentación contra la presión de la caldera, alimentando así de agua a la caldera. Los inyectores de vapor con toberas bien diseñadas pueden desarrollar presión de agua de hasta 50 psi (33,5 kg/cm<sup>2</sup>) por encima de la presión de vapor utilizada, pero la temperatura del agua entrante debe ser menor de 150 °F (65 °C) para evitar la vaporización en el cuello de la tobera. El beneficio adicional de un inyector de vapor es que también calienta el agua de alimentación a la caldera; sin embargo, su rendimiento de bombeo está en el rango del 5 por 100 a causa de la baja expansión del vapor (caída entálpica). Las principales ventajas del inyector de vapor-agua son simplicidad, construcción compacta e inexistencia de partes móviles.

La Figura 12.4 muestra un inyector doble que está diseñado para inyectar agua más caliente que el inyector simple, previamente descrito. Se utilizan dos toberas, una para elevar el agua y la otra para forzar o inyectar el agua en la caldera. Se usa una palanca para operar la válvula principal de vapor y por ello se llama válvula de palanca o émbolo de vapor. En funcionamiento, la palanca se empuja justo para abrir la válvula principal de vapor, la cual entonces comienza la parte elevadora de agua del ciclo. Una vez que el cebado o tiro se ha establecido, la palanca se empuja más a fondo para abrir la válvula-émbolo de vapor y cerrar la válvula de exceso de caudal, como en el diseño del tubo simple. El vapor de la válvula de caudal excesivo obliga al agua del tubo de aspiración a ir al tubo de inyección forzada, desde donde es impulsada a presión suficiente para vencer la válvula de entrada a caldera y entonces entrar en la caldera.

Los *problemas del inyector* pueden ser los siguientes: alimentación de agua demasiado caliente, aspiración demasiado fuerte, válvula de caldera que pierde lo que permitiría al vapor retroceder por la línea de descarga del inyector, fugas en la tubería de aspiración que rompen el vacío de modo que el agua no puede ser aspirada, presión de suministro de vapor demasiado baja para el diseño de la tobera que desceba la aspiración, vapor demasiado saturado sin permitir al vapor condensar adecuadamente por diseño de la tobera y obstrucciones, suciedad, polvo y óxido cerrando los huecos de aspiración, tubos y tobera.

Las instrucciones de mantenimiento del fabricante deberán seguirse de modo que esta bomba de tipo de emergencia pueda estar disponible para usarla cuando sea necesario.

**Bomba de alimentación en reserva de la caldera de alta presión.** Las calderas que tengan más de 500 pies cuadrados (45 m<sup>2</sup>) de superficie de calefacción deberían tener dos sistemas de alimentación. Sin embargo, el Código permite un sistema de



**Figura 12.4.** Un inyector de agua por vapor de doble tobera puede forzar agua a temperatura más elevada al interior de la caldera que uno de simple tobera de inyección.

alimentación bajo las siguientes condiciones: las calderas con quemadores de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos en suspensión pueden estar equipadas con un sistema único de alimentación de agua, supuesto que haya medios de corte de llegada del combustible si se interrumpe la alimentación de agua. Si el hogar de la caldera y sistemas de combustible pueden retener suficiente calor almacenado para causar daños a la caldera si el suministro de agua se interrumpe, entonces se siguen necesitando dos sistemas de alimentación de agua.

Para aquellas calderas de sistemas de combustible sólido que no está en suspensión (pulverizado) debe operarse por vapor. La fuente de alimentación debe ser capaz de suministrar agua a la caldera a presión, al menos, un 6 por 100 más elevada que la presión de ajuste de cualquier válvula de seguridad.

Las calderas de carbón alimentadas mediante alimentador mecánico, o calderas con refractarios o lechos de combustible caliente, requieren una atención especial para la disponibilidad de agua en el caso de una interrupción del suministro eléctrico a las bombas de alimentación de agua accionada por motor eléctrico y a sus controles de tipo eléctrico. Se recomienda que se mantenga una bomba de alimentación de agua a caldera accionada por turbina de vapor o bien inyectores de vapor de suficiente capacidad para prevenir y evitar el corte del suministro eléctrico que implica corte de alimentación de agua de caldera. Otra alternativa es tener autogeneración eléctrica que pueda suministrar fluido eléctrico a los motores de las bombas de alimentación de caldera, preferiblemente en un circuito de emergencia separado del principal. Donde haya una gran cantidad de calor almacenado en el hogar, existe el riesgo de sobrecalentamiento e incluso rotura de los tubos si las bombas (eléctricas) no pueden ser operadas debido a un fallo eléctrico.

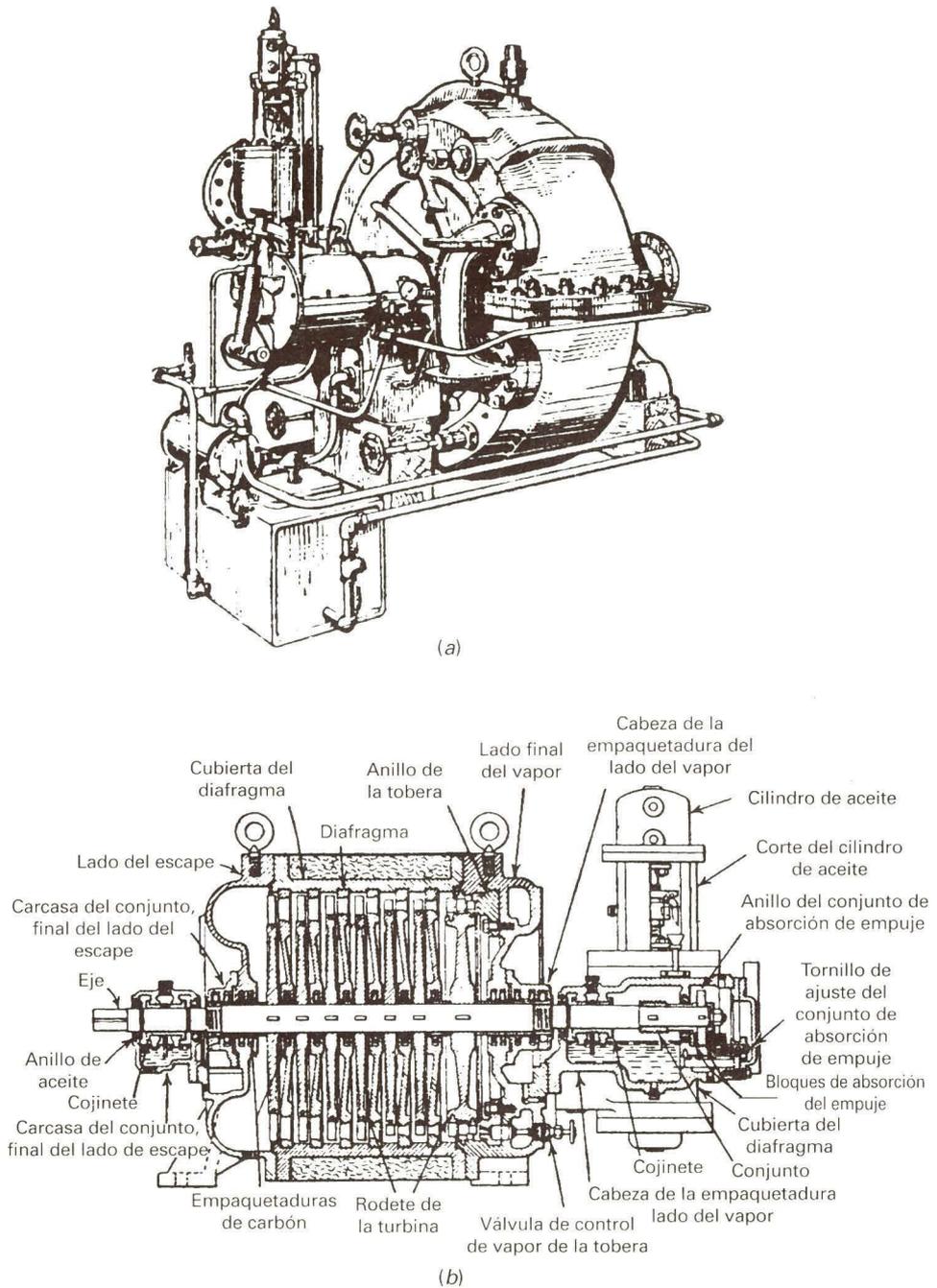
**Turbinas de accionamiento mecánico.** Las turbinas de vapor para accionamiento mecánico se usan en las plantas de calderas para arrastrar las bombas de alimentación y ventiladores de tiro inducido y de tiro forzado, así como para accionar generadores eléctricos de emergencia. Es también común emplear accionamiento dual, con una turbina de vapor en un extremo del eje de una bomba de alimentación o ventilador y un motor eléctrico en el otro extremo, de modo que si falla la corriente eléctrica cuando la unidad está accionada por ella, la turbina de vapor entre automáticamente en servicio. También es normal utilizar el accionamiento de la turbina en invierno para usar el vapor de escape para aumentar el balance térmico de la planta.

Los tamaños del accionamiento por turbina de vapor pueden variar dependiendo del tipo y tamaño de la planta. Las turbinas más pequeñas están normalizadas por lo que respecta a la potencia, presión de entrada del vapor, presión de escape y velocidad, con reguladores disponibles para operación a velocidad constante y/o variable. La Figura 12.5a de la página siguiente muestra una unidad monoetapa equipada con un relé regulador, lubricación de alimentación forzada y también toberas controladas por válvulas manuales para aumentar o disminuir el caudal de vapor según los cambios de carga. Las válvulas manuales se utilizan también para suministrar potencia de arranque cuando se comienza el trabajo de la planta a una presión inferior, para operar a baja velocidad por debajo del rango del regulador, y también para dar una capacidad extra durante los períodos de demanda elevada. A medida que la potencia se incrementa, se utilizan turbinas de vapor multietapa, como se muestra en la Figura 12.5b. Esta unidad tiene siete etapas de presión.

La selección de una turbina de vapor para accionamiento mecánico requiere un cuidadoso estudio del balance térmico de la planta para determinar si el vapor de escape de la turbina puede utilizarse eficientemente en la planta para agua de alimentación o de proceso de calefacción. Si el vapor de escape tiene que ventearse a la atmósfera, se pierden o desperdician 1.000 BTU/libras (0,555 termias/kg = 555 kcal/kg).

La operación y mantenimiento de las turbinas de vapor deberá seguir unas prácticas muy cuidadosas de mecánica de máquinas, incluyendo las siguientes instrucciones del fabricante de turbinas:

1. Asegurarse de que toda agua o condensado se retira del casing (o envolvente) de la turbina, empaquetadura y línea de vapor antes de abrir la válvula de estrangulamiento o regulación de la turbina. Esto evitará el golpeteo de álabes y toberas, que han sido diseñadas para manipular un vapor más ligero. También evita la corrosión de álabes y toberas y la posible rotura de las mismas por el vapor húmedo.
2. Comprobar siempre el nivel de aceite del depósito y el trabajo u operación de todas las bombas de aceite para asegurarse de que los cojinetes están siendo bien lubricados. Revisar los depósitos de aceite para evitar que el agua pueda venir del refrigerador de aceite (con fugas) o para evitar condensados provenientes de unos sellos defectuosos o con fugas que puedan ir a parar al aceite de los cojinetes.
3. Calentar la turbina de vapor según la rampa de subida de temperatura prevista por el fabricante para evitar tensiones teóricas expresivas.



**Figura 12.5.** (a) Turbinas monoetapa con toberas operadas manualmente para disminuir o aumentar el vapor adicional más allá de la capacidad del vapor. (b) Turbina de impulso multietapa que tiene siete etapas de vapor.

4. Comprobar el dispositivo de emergencia por sobrevelocidad, utilizando el dispositivo manual antes de arrancar y, anualmente, mediante un test de sobrevelocidad real según las instrucciones del fabricante.
5. Mantener un control y registro del rendimiento de trabajo, anotando vibraciones, pérdidas de sellado del eje, presión de primera etapa y del escape y consumo de vapor. Las condiciones anormales de trabajo pueden requerir una mayor investigación de sus causas y pueden implicar la apertura de la turbina para comprobar el desgaste de alabes y toberas, de cojinetes y piezas internas similares que pueden requerir reparación y/o recambio.

Es también importante tener una válvula de seguridad en el lado del escape de una turbina de vapor de contrapresión, antes de toda válvula de cierre del escape, para evitar que el casing o cubierta de la turbina sea expuesto a sobrepresión si la válvula de la línea de escape se cierra por equivocación cuando se efectúa el arranque de la turbina de vapor.

### **Ventiladores de tiro inducido y tiro forzado**

Los *ventiladores de tiro inducido* impulsan los productos de la combustión de una caldera y los dirigen a la chimenea para su descarga a la atmósfera. El *ventilador de tiro forzado* toma aire de la atmósfera y lo entrega a través de conductos y precalentadores de aire a los quemadores, e incluso lo introduce directamente en el hogar, dependiendo del tamaño de la caldera y su disposición. Los ventiladores de tiro forzado producen alguna presión de aire y, si la envolvente de la caldera no es estanca, los gases del hogar pueden escapar a la sala de calderas a través de juntas o grietas no estancas. En las plantas calentadas por carbón, la sala de calderas puede comenzar a estar cubierta por carbón inquemado y cenizas. Esto puede ser una penalización para la operación con una presión positiva en el hogar (sobrepresión). En un hogar en depresión (presión negativa), el ventilador de tiro inducido crea unas condiciones de vacío parcial en el hogar y el aire atmosférico penetra en él a través de juntas defectuosas o grietas de la cubierta del hogar. Esto reduce la eficiencia o rendimiento de combustión introduciendo exceso de aire en el hogar. Para hacer menores los efectos de las fugas se usa el tiro equilibrado en los sistemas grandes de calderas; esto mantiene un ligero vacío en el hogar, del orden de 0,1" (0,25 cm) vacío en columna de agua.

Se utilizan enclavamientos entre los ventiladores y el equipo de combustión o quemadores para evitar problemas de combustión en la caldera. Los ventiladores grandes de tiro inducido en las grandes calderas de tubos de agua han producido elevadas presiones negativas en el hogar, resultante de fallos en los sistemas de enclavamiento. Las grandes presiones negativas han ocasionado la implosión en el hogar que provocó asimismo el hundimiento de las paredes o muros de tubos de agua. La erosión de los álabes en los ventiladores de tiro inducido originada por las partículas que van en los gases de combustión requiere un diseño que evite el deterioro rápido del material de los álabes. Se usa la monitorización de vibraciones para detectar el desequilibrio debido al desgaste por abrasión o a los depósitos anormales que se alojan en el ventilador. Se debe emplear la periódica inspección, limpieza y equilibrado en los ventiladores de tiro inducido para mantenerlos en condiciones de fiabilidad de operación.

El ventilador centrífugo es el más común de los ventiladores, pudiendo dividirse en dos tipos: 1) *de chapas de acero*, como se ve en la Figura 12.6a, y 2) *multiálabe o multihoja*, como se muestra en la Figura 12.6b. En el caso del ventilador de chapas de acero, los rodetes constan de una o dos «arañas», teniendo cada una de seis a doce brazos. Cada par de brazos tiene una hoja o chapa plana que se extiende radialmente como se ve en la Figura 12.6a. Las chapas pueden ser rectas o curvadas, bien hacia adelante o hacia atrás. Estos tipos de ventiladores se utilizan generalmente con accionamiento mecánico por motor.

El *ventilador multipala o multihoja* se construye con dos o más anillos y tiene muchos álabes estrechos y curvados remachados o soldados in situ entre los anillos, como se muestra en la Figura 12.6b.

El diseño de ventiladores centrífugos incluye los siguientes: 1) número de entradas: únicas o dobles; 2) altura del rodete; 3) diámetro del rodete; 4) salida o impulsión: horizontal, vertical, superior, inferior o angular; 5) alojamiento total, en el que la voluta o caracol está totalmente por encima de la base;  $7/8$  y  $3/4$ , donde la voluta está situada por debajo de la parte superior de la base; y 6) sentido de giro, el de las agujas del reloj o en contra de ellas, como se nota cuando se mira al ventilador desde el lado del accionamiento.

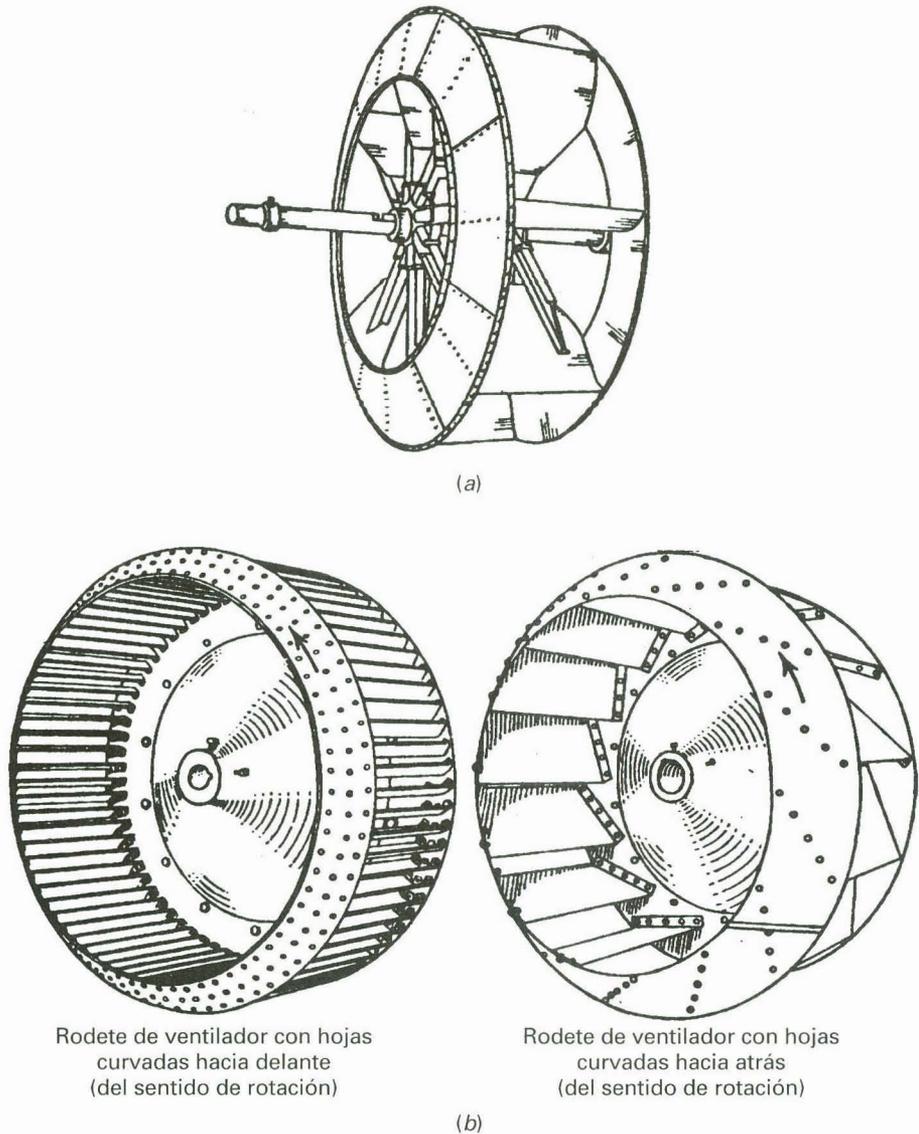
Los ventiladores que son de servicio a elevada temperatura necesitan atención especial. Por ejemplo, los ventiladores de tiro inducido de calderas que queman carbón deben tener cojinetes refrigerados por agua a causa de la elevada temperatura de salida de los gases a los que el ventilador está expuesto. La acción agresiva de las cenizas volantes necesita una construcción y unos materiales más robustos y sólidos, como revestimiento de estelita sobre los álabes para evitar el desgaste rápido de las palas y quizás una rotura repentina de una pieza del ventilador.

El control de *volumen y presión* sobre el flujo de gas puede ser manual o automático. Hay varios métodos de control de volumen y presión: 1) variando la velocidad de accionamiento; 2) compuertas labiadas colocadas a la salida del accionamiento de velocidad constante del ventilador; 3) compuertas regulables colocadas a la entrada (oído) del ventilador como se muestran en la Figura 12.7a de la página 494; 4) álabes de posición o paso variable en los ventiladores axiales; y 5) *bypass* o retorno en diversión donde parte de los gases se dirigen a la aspiración o se descargan a la atmósfera.

## **Leyes de rendimiento del ventilador centrífugo**

De modo similar a las bombas centrífugas, para un ventilador determinado, su sistema de conductos y densidad del aire, existen las siguientes relaciones sobre rendimiento (véase la Figura 12.7b):

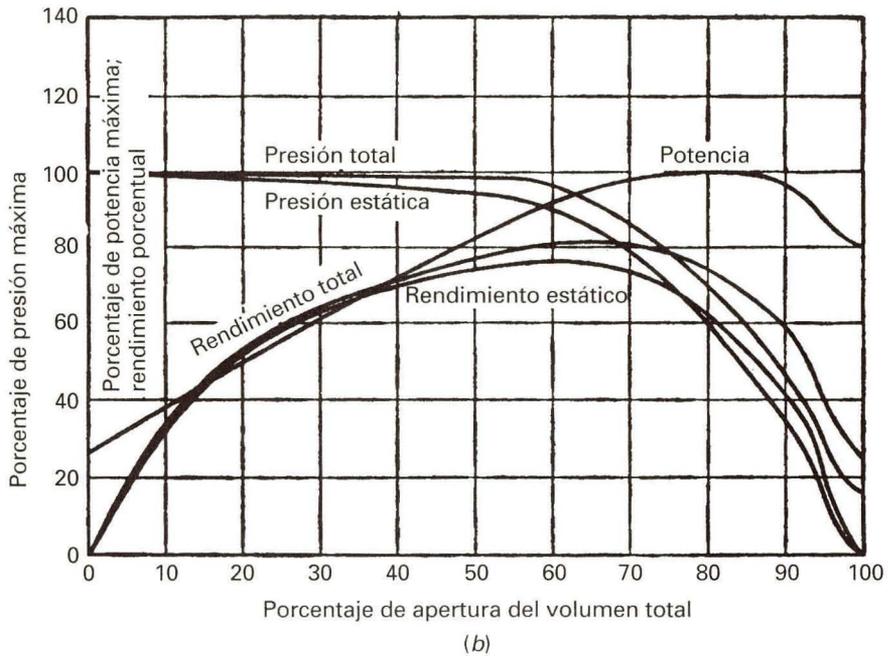
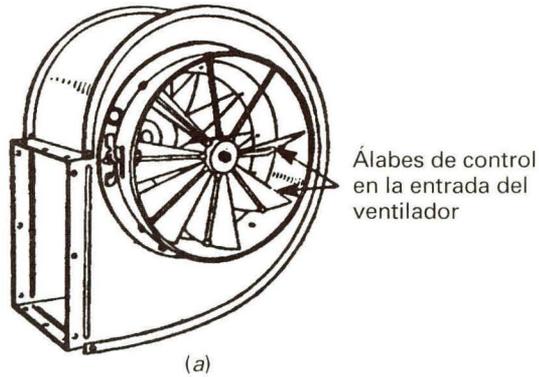
1. El caudal varía en relación directa con la relación de velocidades.
2. La presión estática varía como la relación de velocidades.
3. La velocidad y el caudal varían como la raíz cuadrada de la presión estática.
4. La potencia varía como el cubo de la relación de velocidades o de caudales.
5. La potencia varía como  $3/2$  de la potencia de la relación de presiones estáticas.



**Figura 12.6.** Rodetes de ventilador de chapa de acero y multiálabe. (a) Rodete de ventilador de chapa de acero utilizado para bajas velocidades. (b) Los ventiladores multiálabe pueden tener las hojas curvadas hacia delante o hacia atrás (del sentido de rotación).

6. La velocidad del aire varía directamente con la relación de velocidades o de caudales.

Cuando la presión estática es *constante* a la salida del ventilador, se aplican las reglas de la página siguiente.



**Figura 12.7.** (a) El control para este diseño es por álabes reglabes en oído de aspiración del ventilador. (b) Curvas típicas de rendimiento para un ventilador multipala de álabes curvados hacia atrás.

1. El caudal y la potencia varían como el cuadrado del diámetro del rodete.
2. La velocidad varía inversamente con la relación de diámetros.
3. A presión estática constante, la velocidad, caudal y potencia varían inversamente con la raíz cuadrada de la relación de densidades del aire.
4. A caudal y velocidad constantes, la potencia y presión estática varían directamente con la relación de densidades del aire.

**Ejemplo.** Para las condiciones 1 y 2 anteriores, un ventilador tiene un diámetro de rodete de 22,75" (578 mm) con un caudal a 7.890 pies cúbicos/minuto (0,027 m<sup>3</sup>/min) a una presión estática de 6<sup>1/2</sup>" (165 mm) y una velocidad de 2.064 rpm. Suponiendo que cada ventilador opera a la misma presión estática de 6<sup>1/2</sup>" en columna de agua, ¿cuál sería la capacidad (caudal) y velocidades de un ventilador de 45,5" (1.155,7 mm) de diámetro. Por la regla 1:

$$\text{Capacidad} = 7.890 \text{ pies cúbicos/min} \times \left( \frac{45,5}{22,75} \right)^2 = 31.56 \text{ pies cúbicos/min}$$

Y por la regla 2, la velocidad será:

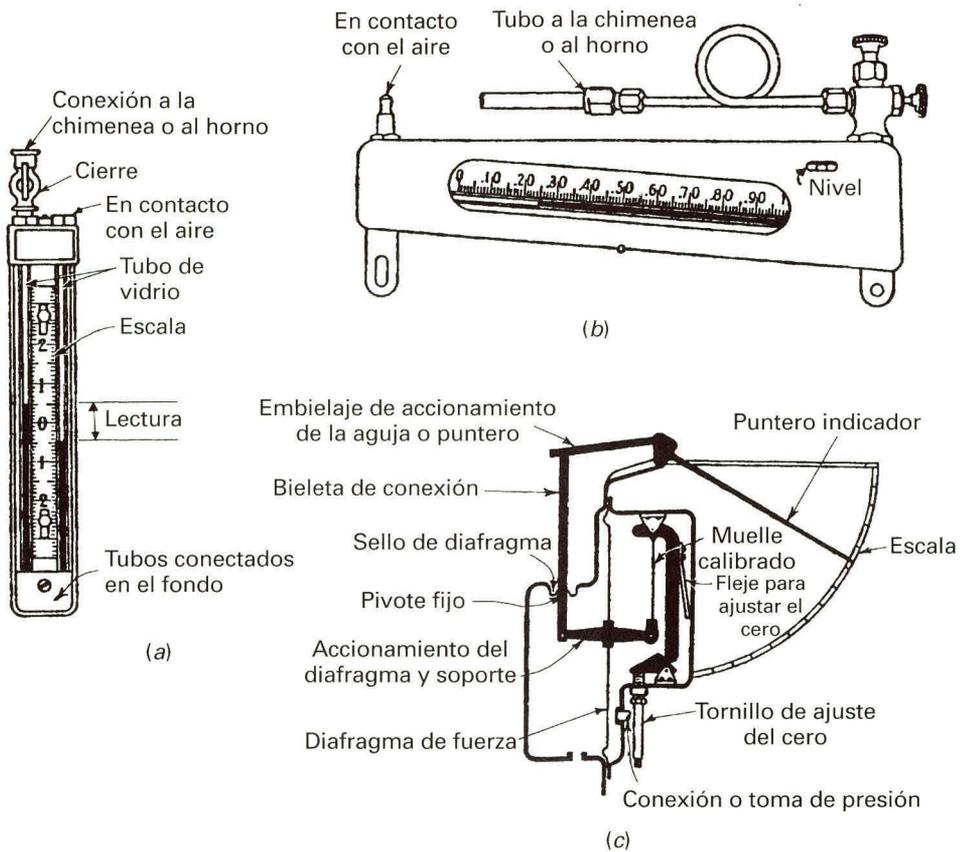
$$2.064 \times \frac{22,75}{45,5} = 1.032 \text{ rpm}$$

## Tiro

El *tiro* puede ser natural, como el de una chimenea de un hogar, o mecánico, donde un ventilador se utiliza para mover el aire o gas. El movimiento se produce por una diferencia de presión entre la entrada y la salida y se mide en términos de altura en pulgadas o milímetros de agua de una columna de agua, que es equivalente a la presión del agua actuando como columna de agua. La Figura 12.8 de la página siguiente muestra algunos tipos de medidores de tiro. En los manómetros de tipo tubo en U, un lado está conectado al conducto, chimenea u hogar donde se mide el tiro, mientras el otro extremo está abierto a la atmósfera. La diferencia en el nivel de agua es una medida de la diferencia de presión. Por ejemplo, para convertir 3" de tiro en presión, recuerde que un pie cúbico de agua pesa 62,4 libras (un centímetro cúbico pesa 1 gramo) y dividiendo este peso por el pie cúbico obtenemos: 62,4 libras/1.728 = 0,036 psi/in<sup>3</sup> de agua. Así, para un tiro de 3", la presión sería de: 3 × 0,036 = 0,108 psi (1 g = 1 cm<sup>3</sup>/1 cm<sup>2</sup> = 10 mm = 1 kg/1.000 cm<sup>2</sup> = 0,001 kg/cm<sup>2</sup>).

El control automático de tiro es la regulación automática de ventiladores y compuertas para aumentar o disminuir el caudal de aire para mantener la presión del vapor constante en la caldera a medida que cambia la carga, y también para mantener buenas condiciones de combustión. Los dispositivos para controlar tiro, velocidad de ventilador y posición de compuerta frecuentemente emplean diafragmas. Los cambios de aire o presión de vapor actúan los diafragmas sensibles para abrir o cerrar contactos eléctricos, válvulas actuadas por fluidos o válvulas de vapor que controlan la velocidad del ventilador o posición de la compuerta.

**Operación y mantenimiento de ventiladores.** Los ventiladores y soplantes deberían arrancarse con caudal mínimo y aumentado gradualmente hasta carga plena para evitar golpes de ariete sobre los componentes de la instalación y también evitar la sobreintensidad o sobrecarga eléctrica del arranque del motor eléctrico. Como toda maquinaria, debería mantenerse limpia y libre de depósitos; de otro modo, pueden producirse el ataque por corrosión y el desequilibrio con el resultado de la producción de vibraciones. Los ventiladores y soplantes deben preservarse de la acción destructiva de un funcionamiento prolongado con vibración anormal. Por esta razón, un chequeo diario debería incluir un control de la vibración.



**Figura 12.8.** Medida de tiro. (a) El tubo en U muestra una lectura diferencial del agua en pulgadas. (b) El manómetro inclinado debe mantener el nivel horizontal para mostrar lecturas correctas. (c) Medidor de tiro de tubo de diafragma.

Los ventiladores y soplantes críticos, y los situados fuera de la atención del operador, deberían tener tomas de vibración que mostraran esta vibración en las salas de control. Las causas de la vibración pueden incluir la falta de fijación de las cimentaciones o cimentaciones débiles, desequilibrio\* debido a desgaste erosivo, como el producido en los ventiladores de tiro inducido por las cenizas volantes, roturas por diseño de ángulos afilados y roturas por tensiones corrosivas, por citar unos pocos. Por tanto, los ventiladores deberían ser inspeccionados internamente cada año para detectar desgaste e incrustaciones en los álabes y sus fijaciones. Esto es especialmente aplicable a ventiladores asignados a trabajos en condiciones crí-

\* *N. del T.*: Por desequilibrio, el ventilador puede romper los espárragos de fijación (a cizalladora) a la cimentación o bien romper los rodamientos o cojinetes de un modo continuo. Hay que equilibrar estática y dinámicamente el conjunto del rotor con su polea de accionamiento, si queremos evitar estas costosas reparaciones o reposiciones de rodamientos.

ticas y a aquellos cuyos costes de reparación o sustitución son especialmente elevados.

Una lubricación adecuada y el mantenimiento de la calidad del aceite lubricante son otras importantes tareas de los operarios que tienen ventiladores y soplantes bajo sus cuidados y control.

**Calentadores de aire.** Los calentadores de aire se aplican a las calderas que queman combustibles sólidos y raramente a calderas que queman gas o combustibles líquidos. Los calentadores de aire proporcionan aire caliente para evaporar algo de humedad del combustible sólido, lo cual ayuda a la combustión rápida y también para extraer calor de los gases de escape y así ahorrar energía o combustible.

La energía térmica que hay en los gases de escape de las grandes centrales se recupera parcialmente mediante economizadores, que precalientan el agua que va a la caldera. Los economizadores, sin embargo, se usan para las calderas que queman combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, se utilice o no un calentador de aire. Los economizadores son intercambiadores de calor más sencillos que los calentadores de aire.

Los calentadores de aire se clasifican en: 1) recuperativos; o 2) regenerativos. En el calentador de aire *recuperativo*, Figura 12.9a de la página siguiente, el calor se transfiere del lado del medio caliente a través de los tubos al aire que va a calentarse en el otro lado. En el calentador de aire *regenerativo*, Figura 12.9b, el calor de los gases calientes calienta un medio de almacenamiento térmico, como unos cestos\*, que son rotados hacia el lado del flujo de aire entrante cediendo el calor almacenado en los cestos. La corrosión y ensuciamiento pueden constituir un problema en los calentadores de aire, que los fabricantes han tratado de resolver con la utilización de materiales resistentes a la corrosión y mediante un buen espaciado de los componentes de los intercambiadores térmicos. Una inspección planificada y un programa de mantenimiento, no obstante, se necesita en los aparatos de intercambio de calor para evitar el desgaste y las consecuencias del colmataje.

## Depósitos y emisiones de la zona de fuego

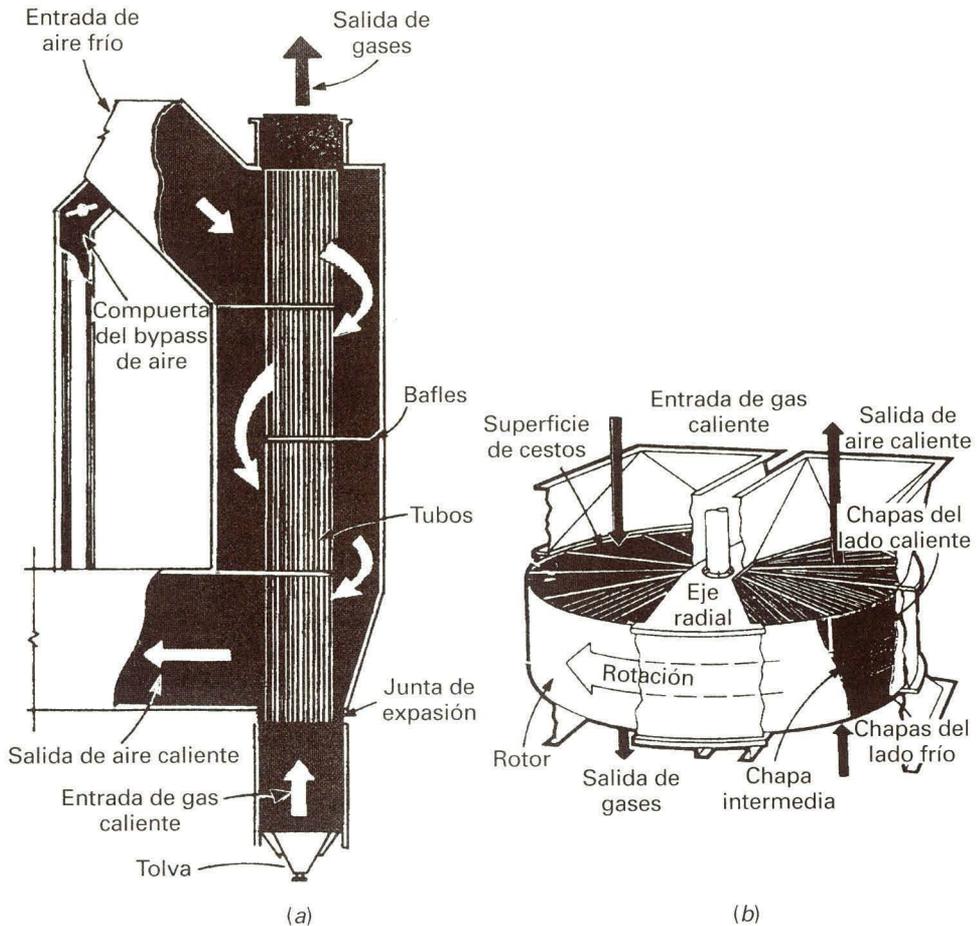
**Sopladores de hollín.** Se usa vapor o aire para soplar y limpiar de hollín las superficies de calefacción (Figura 12.10c de la página 499). La frecuencia del soplado de hollín depende del aumento de temperatura de los gases de escape, que indica al operador de caldera cuándo soplar los tubos. Cuando sople, asegúrese de mantener la producción de vapor de caldera a una tasa razonablemente alta. Esto evita la posibilidad de combustión o explosión de las bolsas de depósitos llenas con combustibles quemados.

¿Qué precauciones deben seguirse para evitar erosiones en tubos, chapas tubulares o bafles de calderas?

El aire o vapor utilizado debería ser seco para evitar el impacto de las gotitas de agua sobre las superficies de los tubos. Los sopladores de hollín deberían drenarse

---

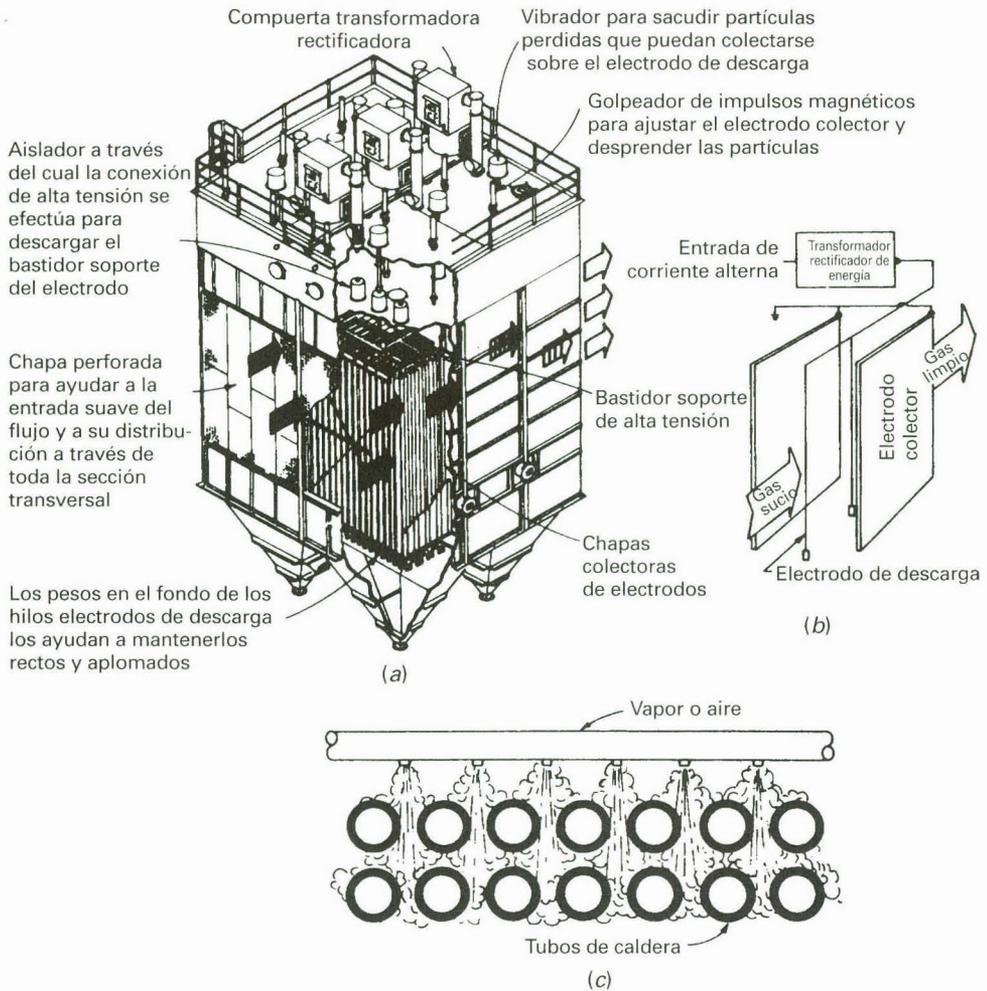
\* *N. del T.*: Con un relleno de fibras o chapas metálicas, para almacenar el calor (de los gases) al calentarse.



**Figura 12.9.** Tipos de calentadores de aire. (a) El calentador de aire recuperativo transfiere el calor a través de los tubos. (b) El calentador de aire regenerativo almacena calor en cestas, en un sentido de rotación, y después transfiere calor al aire en el otro sentido de rotación.

de todo condensado antes de su utilización. El alineamiento de las toberas de los soplores rotatorios, no retraíbles, debería mantenerse como se haya diseñado; de otro modo los chorros de las toberas chocan sobre los tubos y producirán desgaste erosivo que a su vez causarán la rotura del tubo.

La *descarga de partículas* es uno de los principales problemas en la combustión del carbón y otros combustibles sólidos. Las calderas de lecho fluidizado se utilizan para limitar la descarga de dióxido de azufre (lluvia ácida). Los aparatos lavadores de tipo *scrubber* se usan para lavar las partículas antes de ventearlas por la chimenea. Los filtros de mangas se utilizan también para controlar la descarga de partículas sólidas finas mediante la instalación de celdas de filtros de mangas en la corriente de gases de combustión de las calderas que queman carbón.



**Figura 12.10.** (a) Precipitador electrostático de partículas mostrando los componentes principales. (b) Bases de la operación de precipitación electrostática: las partículas entrantes a un precipitador con el gas sucio se cargan en el electrodo de descarga. Después las partículas emigran a electrodos colectores, a los que se adhieren perdiendo su carga. Las partículas son descargadas de las chapas colectoras, mediante vibradores o golpeadores, y caen en tolvas situadas debajo de las chapas. (c) Soplador de hollín de posición fija que se usa para las disposiciones de tubos alineados de calderas.

La combustión del carbón y otros combustibles sólidos en calderas requiere equipos auxiliares para eliminar cenizas volantes y otras partículas que se emiten a la atmósfera. El equipo normalmente utilizado incluye lo siguiente:

1. Las celdas de mangas emplean mangas que ahora normalmente son de fibra de vidrio y que pueden mantenerse sin quemarse a temperaturas desde 275 a 550 °F (135 a 288 °C).

2. Aparatos lavadores (*scrubbers*) que lavan las emisiones de partículas que salen con los gases de combustión y forman lodos que se depositan en pozos o campos.
3. Precipitadores electrostáticos (Fig. 12.10a).

Estos precipitadores producen una carga eléctrica entre 2 electrodos a través de los cuales pasan los gases de combustión. Las partículas en los gases se cargan y son atraídas, cargadas positivamente y puestas a tierra en el electrodo colector. Las partículas así recogidas son descargadas en tolvas por golpeteo del electrodo colector (Fig. 12.10b).

**Filtros de mangas.** Las normas de emisiones han aumentado en las centrales térmicas alimentadas con combustibles fósiles de modo que el equipo de recolección de partículas ha alcanzado el 99 por 100 de eficiencia. Los filtros de mangas están siendo utilizados como precipitadores electrostáticos. Los filtros de tejido o mangas requieren consideraciones especiales de diseño por el flujo de emisiones, para que todos los filtros de mangas retengan una cantidad proporcionada, y requieren una limpieza periódica, lo que normalmente se consigue por inversión del caudal de aire (véase la Figura 12.11).

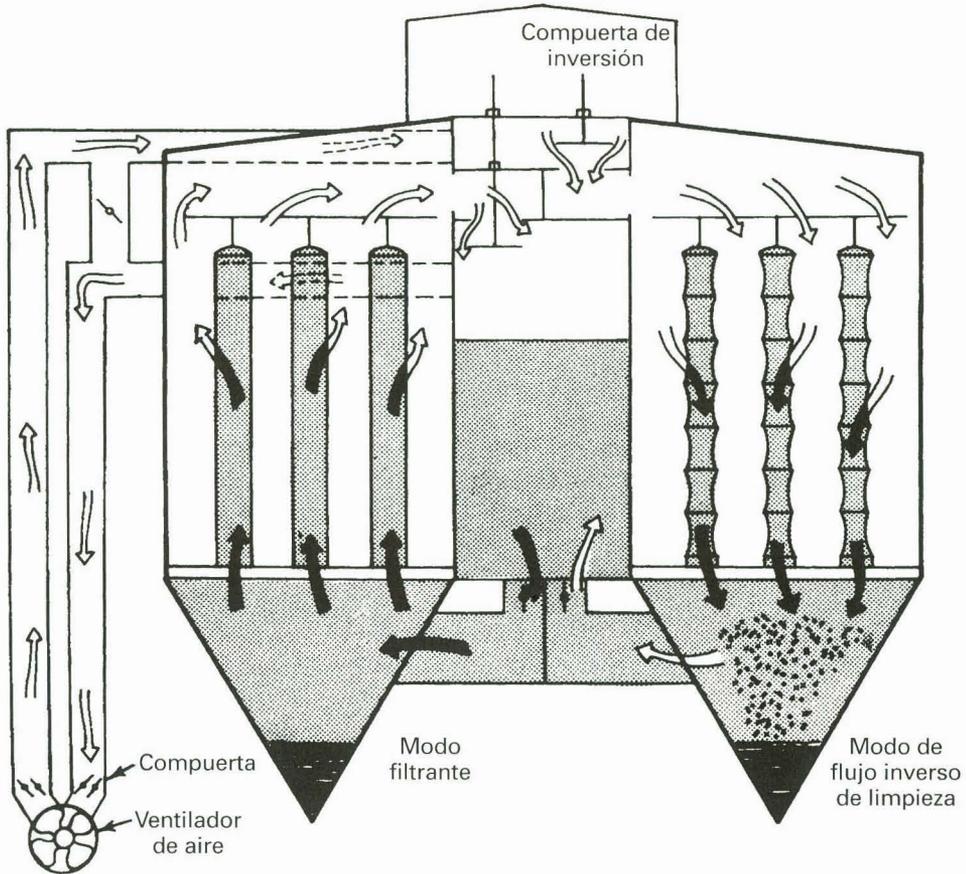
En la unidad mostrada, los gases sucios fluyen desde el interior de las mangas al exterior con inversión periódica a través de las mangas, lo que produce un movimiento significativo de éstas que desprende el polvo recogido. Otro diseño, llamado unidad de *sacudidas/deflectación*, también recoge polvo en el interior de las mangas o bolsas, pero, para limpiarlas, la parte superior es sacudida por un mecanismo de accionamiento diseñado para imponer la frecuencia y amplitud de sacudida adecuada a las mangas para su limpieza. Es normalmente un método de limpieza fuera de línea.

Para aplicaciones industriales de calderas, los filtros de mangas tienen un sistema denominado de *chorro-pulsante* que se usa muy a menudo. El flujo de gases cargado de polvo se dirige a la bolsa o manga y la limpieza se cumple mediante un chorro de aire a elevada presión hacia el extremo abierto de la manga, que está temporizado de modo que una válvula se abra para dirigir un chorro o impulso de aire al saco o manga abierto. Las unidades pulsatorias también pueden limpiarse durante el tiempo que están en línea o fuera de ella.

La selección del tejido de las mangas filtrantes es el elemento más importante en un sistema de filtros de mangas, que utilizan las unidades de las centrales y están tejidas o fabricadas principalmente con fibra de vidrio entelada. También se usan fibras de materiales fluorocarbonados, teflón, etc. El material de las mangas es una parte sometida a desgaste severo a causa del polvo abrasivo y generalmente requiere un recambio periódico. La pérdida o caída de presión a través de las mangas es un indicador importante del rendimiento de un filtro de mangas según las indicaciones o líneas maestras del fabricante. Una caída o pérdida de carga muy grande puede necesitar de una limpieza de mangas manual o requerir largos períodos fuera de la línea de trabajo para su limpieza.

### **Elementos auxiliares de la alimentación de agua de calderas**

Los elementos auxiliares de la línea de agua de calderas pueden dividirse en tres grandes grupos:



**Figura 12.11.** Por medio de compuertas de los conductos y temporizados automáticos, los gases de combustión fluyen a los filtros de mangas, divididos en dos partes: el modo filtrante y el modo de limpieza de mangas, por el flujo invertido de aire a través de las mangas filtrantes.

1. Equipo que precalienta el agua de alimentación, pero es exterior al flujo de productos de combustión.
2. Equipo que combina algún calentamiento exterior del agua de alimentación con alguna eliminación de gases indeseables o impurezas en el aporte de agua, como evaporadores o desaireadores.
3. Equipo que trata exteriormente el agua de alimentación de caldera para eliminar impurezas indeseables productoras de incrustaciones tales como los equipos desendurecedores de agua y desmineralizadores.

**Calentadores cerrados de agua de alimentación.** Los calentadores cerrados de agua de alimentación se usan mucho en las plantas de calderas de centrales para precalentar el agua de alimentación por etapas, extrayendo vapor de las turbinas de vapor en lo que se describe como ciclo regenerativo. Sin embargo, las plantas indus-

triales también utilizan el calentamiento de alimentación, pero los tamaños y disposición del agua del calentador variarán, como se ve en la Figura 12.12.

La transferencia térmica del vapor al agua depende de los pies (metros) cuadrados de superficie de calefacción, de la velocidad del flujo de agua a través del calentador y de la diferencia media de temperatura entre el agua y el vapor. Debe darse suficiente tiempo para obtener el incremento de temperatura deseado del agua de alimentación.

Los calentadores de agua de alimentación se utilizan para llevar esta agua de alimentación a la temperatura próxima a la del agua de caldera. Cada 10 °F (12 °C) de aumento de la temperatura del agua de alimentación, el rendimiento de la caldera se incrementa en alrededor del 1 por 100, debido al ahorro de combustible que sería necesario para calentar el agua de caldera en igual proporción. Una ventaja añadida es que las tensiones térmicas en la caldera se pueden evitar alimentando con agua a temperaturas más elevadas.

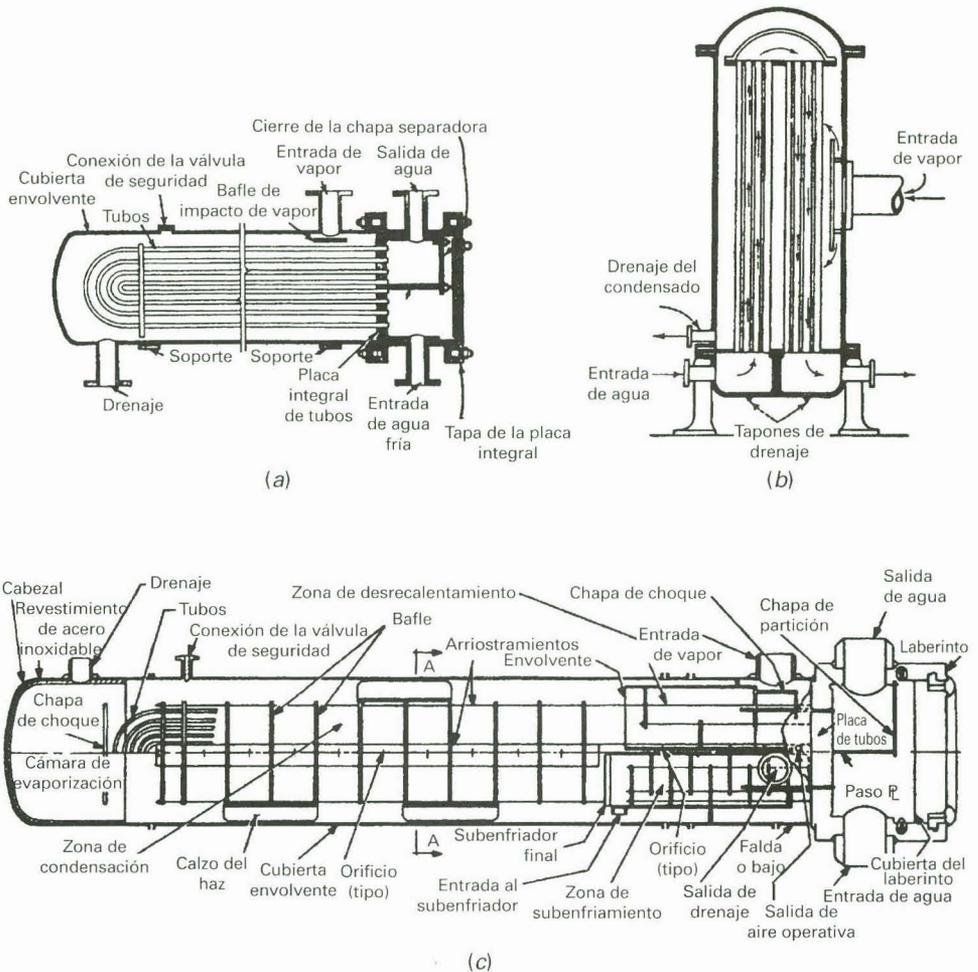
El calentador que se muestra en la Figura 12.12c tiene tres zonas de transferencia térmica: (1) *zona de desobrecalentamiento*, en la que el vapor de extracción de una turbina maximiza la temperatura de salida del agua de alimentación, al transferir algo de calor sensible del vapor al agua de alimentación; (2) *zona de condensación*, donde el vapor de la zona de desrecalentamiento se condensa para calentar más el agua de alimentación; (3) *zona de subenfriamiento*, donde el drenaje de la zona de condensación recupera calor adicional de los drenajes del lado de la envolvente antes de abandonar el calentador cerrado de agua de alimentación.

El *venteo* es importante en estos calentadores, especialmente en la zona de condensación, para eliminar los gases incondensables que pueden desprenderse de los productos químicos del agua de alimentación y del aire que haya podido introducirse. La acumulación de gases incondensables puede producir problemas de corrosión en el calentador y ataques ácidos en zonas muertas del calentador. También disminuye la transferencia térmica en el calentador.

En plantas industriales, el calentador cerrado del agua de alimentación se sitúa después de la bomba de alimentación; así, el agua en el calentador está a mayor presión que el agua de caldera, haciendo posible aumentar la temperatura del agua en mayor grado antes de que pueda ocurrir la vaporización instantánea. Esto también evita problemas de presión de aspiración en la bomba de alimentación de agua.

Una *rotura de tubos* en un calentador de alta presión que usa vapor de extracción de turbina puede afectar no sólo al calentador, sino también posiblemente a la turbina de vapor misma por el agua a alta presión que puede fluir a la turbina a través de la línea de extracción de vapor. Las tensiones térmicas resultantes dentro de la tobera pueden causar serios daños y producir una parada larga y costosa en la planta generadora.

Los calentadores de agua de alimentación tienen controles de nivel de agua y también alarmas por nivel alto y bajo para avisar a los operadores de la inundación de un calentador. Éstos deben controlarse a intervalos frecuentes para evitar depósitos o bolsas de gas en las conexiones del nivel que den señales o lecturas falsas o imprecisas. Las líneas de extracción deberán estar equipadas con válvulas unidireccionales para evitar el retroceso del agua y requieren una prueba periódica. Los numerosos casos de accidentes en turbinas de vapor, provenientes de tubos con fugas de los calentadores, indujeron a la ASME a publicar una línea maestra de recomendaciones para evitar la inducción de agua, cuyos operadores de generadores y



**Figura 12.12.** Tipos de calentador cerrado de agua de alimentación. (a) Calentador horizontal cerrado de tubos en U, para agua de alimentación. (b) Calentador vertical cerrado de cáscara y tubos, para agua de alimentación. (c) Calentador cerrado de tres zonas, tipo alta presión, para agua de alimentación.

turbinas de vapor, así como de calentadores de agua de alimentación que utilicen extracción de vapor, deberían tenerla como material de referencia y guía maestra de inspección y prueba.

La mayoría de los fallos y roturas de tubos pueden detectarse por la vibración de éstos con cargas variables, lo que produce desgastes por erosión en los soportes intermedios, corrosión por problemas de venteo de gases incondensables o fugas-entradas de aire y roturas por tensiones y fuerzas corrosivas en zonas de tensiones elevadas de los tubos.

Muchos métodos de pruebas no destructivas están disponibles hoy día para comprobar calentadores de agua, normalmente en un período de cinco años después del

período de trabajo inicial de un calentador. Las corrientes parásitas son el sistema más utilizado y se lleva a cabo por firmas especializadas en pruebas de tubos.

**Calentadores abiertos de agua de alimentación.** Los calentadores de agua de alimentación abiertos son calentadores de *contacto directo* porque utilizan el calor del vapor para calentar agua a medida que se mezclan. Véase la Figura 12.13a. El calentador abierto trabaja a baja presión, desde la atmosférica a 30 psig (2,1 kg/cm<sup>2</sup>) con el agua y el vapor a la misma presión. La unidad mostrada en la figura 12.13a incluye un separador de vapor y aceite en la entrada. El agua gotea hacia abajo desde la entrada superior sobre unas bandejas que dividen los chorros de agua para operar una mejor mezcla con el vapor y mejorar así la transferencia térmica. El agua calentada pasa a través de un filtro de coque antes de entrar en la bomba de aspiración de la caldera.

El calentador de contacto directo tiene dos divisiones básicas, el *calentador abierto normal* y el *calentador desaireador*. El calentador abierto se diseñó originalmente para utilizar vapor de escape para el calentamiento del agua de alimentación y es esencialmente un calentador de baja presión. Está siempre situado en el lado de aspiración de la bomba de alimentación, y debe estar a una altura suficiente por encima de la aspiración de la bomba para evitar la formación de vapor. (Cuando el agua caliente está sometida a vacío, vaporiza instantáneamente («flasheado»). Así, una bomba que maneje agua caliente, debe tener su aspiración de alimentación bajo presión positiva, o no fluirá el agua a la bomba. Véase la Figura 12.14 de la página 506. Una bomba que aspira vapor se dañará.) La presión requerida (altura requerida) depende de la temperatura máxima del agua.

El principio del calentador abierto es pasar agua fría de alimentación desde la parte superior cayendo sobre una serie de bandejas metálicas. El vapor a baja presión entra entre estas bandejas, condensándose y mezclándose con el agua.

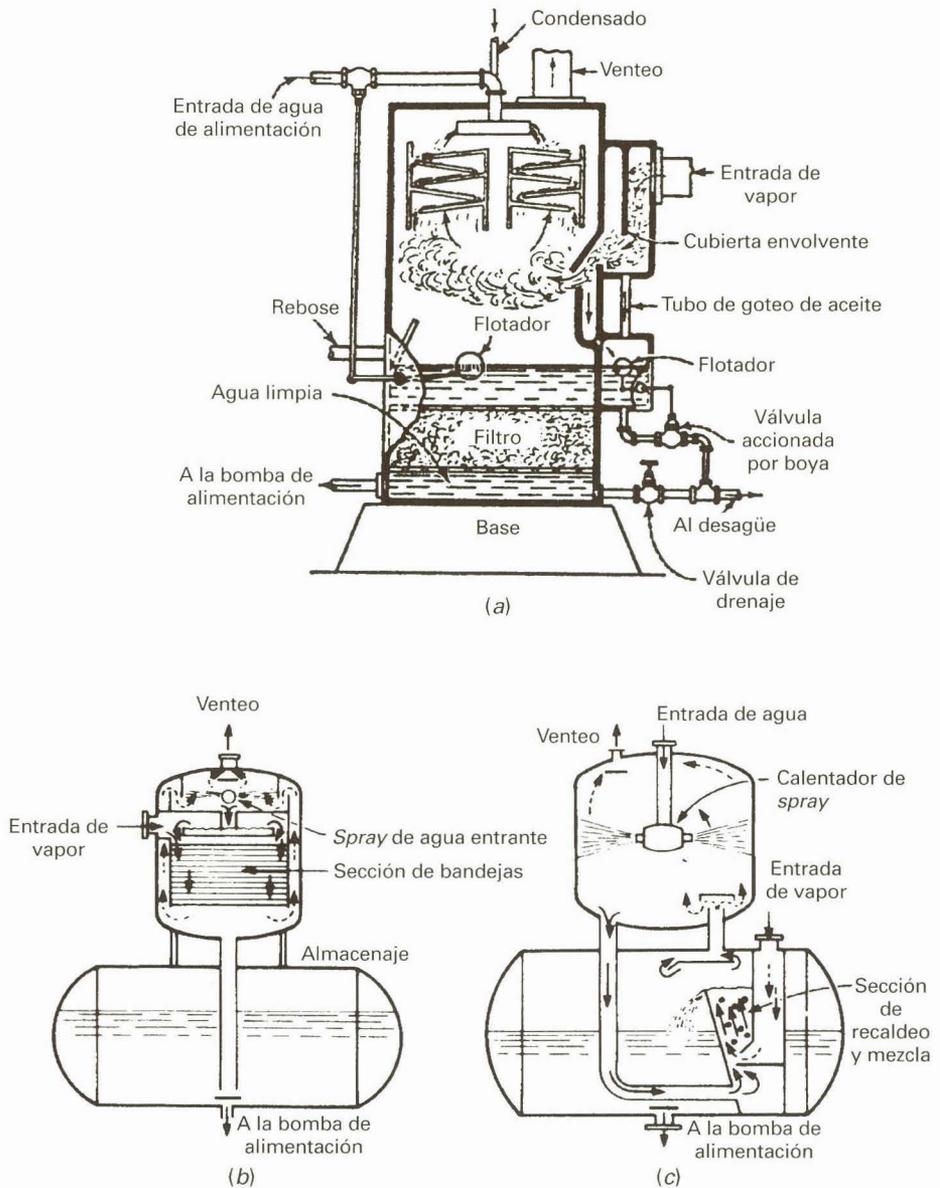
Además, otras funciones llevadas a cabo por el calentador abierto para elevar la temperatura del agua son:

1. Depósito de sólidos que causan dureza «temporal» en el agua.
2. Eliminación de una parte considerable del oxígeno libre al llevar el agua a su punto de ebullición y ventear los gases a la atmósfera.

El paso 1 puede reducir la formación de incrustaciones en la caldera; el paso 2 ayuda a reducir la corrosión y el picado, que son acelerados por el oxígeno libre.

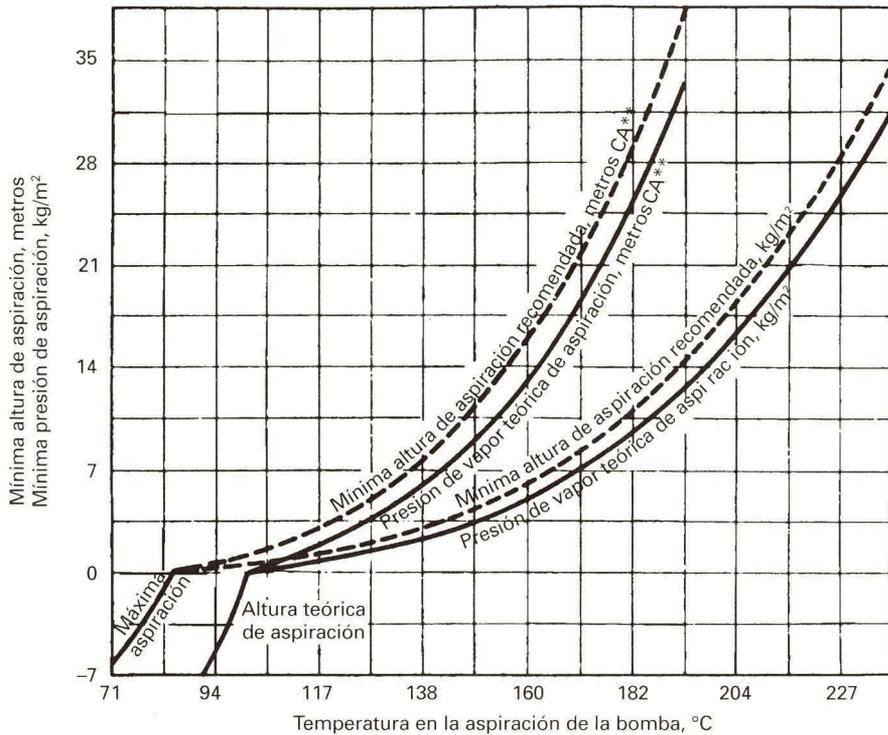
**Calentador desaireador.** El calentador desaireador (Fig. 12.13b y c) es un desarrollo del calentador abierto y aumenta su función de eliminación del oxígeno al trabajar a temperaturas correspondientes a presiones por encima de la atmosférica. Aunque por esta razón no es más que un calentador «abierto» es, sin embargo, un calentador de contacto directo. Se usa con excelentes resultados en plantas de tamaño medio a grande donde hay disponible un volumen suficiente de vapor a baja presión (de 5 a 50 psi = de 0,35 a 3,5 kg/cm<sup>2</sup>) para el proceso de calefacción.

El oxígeno y los gases incondensables son venteados con el vapor a través de una ventilación condensadora en la parte superior del calentador. Aquí, el vapor se condensa y el condensado retorna al sistema con el oxígeno y los otros gases incondensables venteados, por medio de la bomba de vacío, a la atmósfera.



**Figura 12.13.** (a) Calentador abierto del agua de alimentación que usa vapor a baja presión, elimina el aceite y ventea los gases incondensables. (b) Desaireador tipo bandeja. (c) Desaireador tipo *spray*.

Los desaireadores se usan para reducir el oxígeno y otros gases disueltos en una planta de vapor (véanse las Figuras 12.13b y c). El vapor usado en el desaireador aumenta la temperatura del agua de alimentación y esto rebaja la solubilidad del oxígeno en el agua, abandonando el oxígeno al agua y siendo venteado como gas.



**Figura 12.14.** Mínima altura de aspiración para diferentes temperaturas de agua en la aspiración de las bombas de alimentación de sus calderas, como se recomienda por Hydraulic Institute.

Los recientes *incidentes de roturas* de desaireadores en Estados Unidos han dado como resultado una intensificación de la vigilancia y la necesidad del aumento de inspección de soldaduras de estos recipientes, y también evitar los cambios repentinos de presión en la tubería de conexión, lo que se da en el caso de los «viajes»\* que se producen en los turbogeneradores. Normalmente, las líneas de extracción de una turbina de vapor suministran vapor a estos aparatos. Han existido accidentes de golpe de ariete cuando las válvulas o el calentador se cerraban demasiado rápido durante la secuencia del «viaje». Otros incidentes implicaron roturas por fatiga debida a corrosión en zonas de soldadura.

El Instituto de Intercambio Térmico (Heat Exchange Institute), 1300 Summer Ave., Cleveland, OH 44115, Estados Unidos, ha revisado sus normas sobre calentadores desaireadores, que ahora incluyen lo siguiente sobre los diseños de calentadores:

1. Aumentar la tolerancia por corrosión de 1/16" a 1/8".
2. Prohibir el uso del acero al carbono SA-585 en construcciones nuevas.

\* *N. del T.*: En el sentido de cambios repentinos y bruscos (subidas y bajadas) de presión.

\*\* CA = Columna de agua.

3. Exigir un acabado fino de las soldaduras interiores para evitar concentración de tensiones y la formación de picaduras por corrosión.
4. Exigir la eliminación de tensiones residuales de las soldaduras de los depósitos de almacenaje para eliminar tensiones residuales de las soldaduras.
5. Exigir examen total por rayos X de toda envolvente o calderín y de las soldaduras de sus fondos.
6. Exigir inspección húmeda, fluorescente y de partículas magnéticas de las soldaduras de las toberas a la envolvente o calderín.

La reinspección de antiguos de desaireadores ha intensificado el uso de la inspección húmeda, fluorescente y de partículas magnéticas de todas las uniones soldadas interiores, más las conexiones de toberas para suplantar toda inspección visual interior. También se recomienda que las pruebas NDE sean llevadas a cabo por personal cualificado de acuerdo con la normativa SNT-TC-1. Cualquier reparación de grietas deberá ser aprobada por un inspector cualificado por el Código. Las inspecciones se han de realizar con mayor frecuencia ya que los accidentes por fallos debidos a roturas reciben mayor atención en la industria. Los intervalos recomendados son:

1. Un año después de la instalación de nuevas unidades.
2. Si no se encuentran grietas y no se necesitan reparaciones: tres años de intervalo.
3. Las unidades con grietas reparadas: un año o menos después de la reparación.

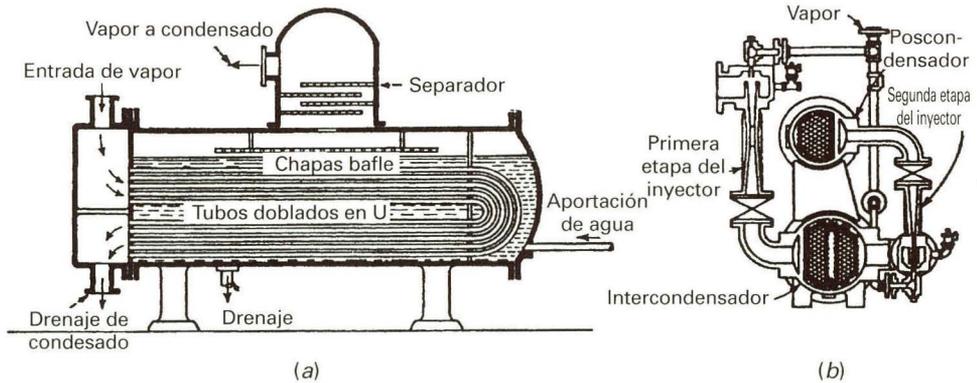
**Evaporadores.** El evaporador mostrado en la Figura 12.15a de la página siguiente es del tipo en los que el agua bruta (con impurezas) es calentada y evaporada. Este vapor se condensa en agua pura para alimentación de caldera. El condensado es a menudo rico en oxígeno, por lo que es necesario incluir en la instalación un calentador desaireador para eliminación del oxígeno.

El evaporador consiste en un depósito que se alimenta de agua bruta para mantener un nivel constante. El haz tubular a través del cual pasa el vapor de 10 a 150 psi (0,7 a 10,5 kg/cm<sup>2</sup>) está sumergido en el agua. El condensado formado en el haz tubular es conducido de nuevo al sistema de agua de alimentación. El vapor o agua evaporada proveniente del agua bruta pasa a través un condensador evaporador donde el vapor se condensa para usarlo como agua de aportación en el suministro de agua a caldera.

La mayor parte de las impurezas que forman incrustaciones se quedan en el agua de la virola evaporadora. A medida que la concentración del agua bruta crece, debería ser reducida purgando el evaporador y rellenándolo.

Con un determinado número de unidades, los evaporadores pueden instalarse en serie (efecto múltiple). Normalmente, cuatro efectos en serie (efecto cuádruple) son suficientes para producir agua pura de un agua bruta, que ya es posible utilizar e incluso ser productiva con la máxima eficiencia práctica.

El suministro de vapor para los evaporadores normalmente se extrae de las turbinas de vapor. El evaporador es más práctico en plantas medianas y grandes utilizando un pequeño porcentaje de aportación.



**Figura 12.15.** (a) Un evaporador de tubos en U prepara el agua de aportación por evaporación y condensación del agua con gases disueltos eliminados por calor, pero los sólidos que permanecen en el evaporador requieren una eliminación periódica, mecánica o química. (b) Se utiliza un inyector de dos etapas para eliminar aire del condensador de vapor.

Los evaporadores se clasifican por el método de vaporización como:

1. *Tipo flash* (evaporación instantánea). El agua caliente se bombea o inyecta a una cámara sometida al vacío, donde se evapora instantáneamente.
2. *Tipo pelicular*. El agua en forma de película pasa sobre tubos rellenos de vapor.
3. *Tipo sumergido*. Los tubos llenos de vapor están sumergidos en el agua que se va a evaporar (véase la Figura 12.15a).

Los evaporadores se utilizan a menudo en plantas generadoras que condensan el vapor de los turbogeneradores y alimentan con él la caldera, necesitando así un mínimo de agua de aportación. En plantas con grandes necesidades de agua de aportación, el uso de evaporadores requerirá tamaños grandes y los costes de operación serán demasiado grandes; por tanto, los métodos de tratamiento químico del agua se usan también para preparar el agua de aportación.

**Eyectores de aire.** En plantas generadoras con condensadores de virola y tubos conectados a turbogeneradores de vapor, los eyectores de aire se usan para eliminar el aire del condensador. Como indica la Figura 12.15b, un inyector de aire es una tobera de vapor que descarga un chorro de vapor de alta velocidad a cerca de 3.500 pies/segundo (1.050 m/s). El vapor fluye a través de una cámara de aspiración y de un tubo de compresión de tipo Venturi. El aire o los gases a evacuar entran en la cámara de aspiración del inyector donde son arrastrados por el chorro de vapor y después descargados a través de la garganta del inyector. La velocidad de la energía cinética se convierte en presión en la garganta del inyector y comprime la mezcla hasta un menor vacío o una presión absoluta más alta. Los eyectores de dos etapas tienen una relación de compresión de alrededor de 8:1 (relación entre la presión de descarga y la de aspiración). El inyector descarga a un pequeño condensador o a un calentador de aire y los gases se ventean a la atmósfera. Los dos chorros mostrados

en la Figura 12.15b están en serie con intercondensadores entre etapas. Estos intercondensadores condensan el vapor y enfrían la mezcla de vapor-aire. Los condensadores se utilizan para el mismo propósito.

### Preparación del agua bruta

Muchas plantas usan agua bruta procedente de ríos o lagos como agua de aportación de caldera. Esta agua bruta se trata externamente por sedimentación, filtración, ablandamiento y eliminación de gases disueltos.

**Sedimentación.** La sedimentación permite a los sólidos sedimentarse y depositarse fuera del agua por caída o goteo a la parte inferior de un depósito cerrado. El proceso puede ayudarse con la utilización de coagulantes tales como alúmina o sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico, aluminato sódico y óxido de magnesio. El agua bruta disponible determinará el coagulante a utilizar. Además, con muchas aguas es necesario añadir un álcali, como cal o cenizas sódicas, para llevar el agua al mejor valor del pH requerido.

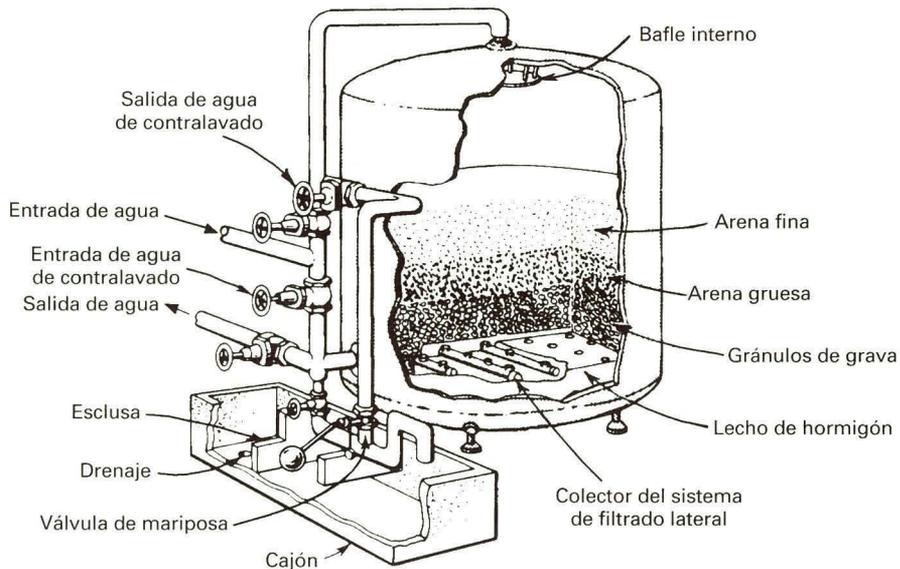
La sedimentación natural combina: (1) la mezcla de productos químicos para ayudar en la adhesión de los sólidos suspendidos a los coagulantes; y (2) las pequeñas partículas son después depositadas juntas, lo que se denomina floculación, por mezcla para formar partículas mayores que se sedimentan más rápidamente. Ésta se lleva a cabo mediante baffles o mezcladores mecánicos (espesadores). Los filtros de presión son también usados para eliminar pequeñas cantidades de sólidos en suspensión, como agua de aportación para calderas, como se muestra en la Figura 12.16 de la página siguiente. La ventaja de la sedimentación mecánica por presión o filtrado es que el agua bruta necesita estar retenida menos tiempo para eliminar los sólidos en suspensión.

El *color* en algunas aguas se elimina químicamente mediante sulfato de aluminio y cobre clorado. Estos compuestos reaccionan con el color del agua para dar un precipitado que sedimenta con los lodos en el proceso de sedimentación.

**Filtración.** La filtración difiere de la sedimentación en que las partículas más pequeñas y ligeras de materia suspendida y coagulada permanecen después de la sedimentación y deben eliminarse por filtración (véase la Figura 12.16). Los filtros más comunes utilizan lechos graduados adecuadamente de arena o carbón de antracita. Cuando las partículas finas entran en un filtro, se sedimentan en la parte superior en unos pocos centímetros de lecho y, con el tiempo, se acumulan hasta la superficie. Si esto no se corrige, empieza a disminuir el caudal.

El *lavado a contracorriente* (o contralavado) se utiliza para eliminar las partículas del lecho circulante. Se pasa agua a través del lecho a una tasa de cuatro a siete veces, y las partículas acumuladas en suspensión son lavadas, sacadas fuera del lecho y enviadas para eliminar con los residuos.

Los filtros de carbón activo se usan para *eliminar olores* y mejorar el sabor del agua. Su construcción es similar a la del filtro de sedimentos y normalmente trabaja a presión. Sin embargo, el carbón no es un filtro sino un absorbente de la sustancia olorosa, y debe reemplazarse periódicamente.



**Figura 12.16.** El filtro mecánico de tipo vertical utiliza filtrantes medios para eliminar los sólidos más finos del agua bruta.

**Ablandamiento del agua.** Los métodos de ablandamiento del agua están siendo mejorados continuamente mediante el estudio químico del agua. Los operadores pueden enfrentarse a los siguientes tipos de equipos de ablandamiento de aguas:

1. Ablandamiento de agua por *precipitación fuera de la solución* de los compuestos que producen la dureza del agua. El método más antiguo utilizado fue el *ablandamiento a la cal*, método seguido por el sistema de *ablandamiento por zeolita*. Hoy día, éste se denomina el método de tratamiento por carbonato, a causa de que el carbonato cálcico precipita fuera del agua. Este compuesto químico es insoluble y sedimenta precipitando fuera de la solución. Debe ser retirado por purga de la zona inferior.

El agua que contiene cantidades apreciables de calcio y magnesio en solución se denomina *agua dura*; el nombre deriva del hecho de que cuando se utiliza jabón con agua dura es difícil obtener espuma. El agua dura es especialmente prohibitiva para su uso en calderas porque las sales cálcicas y de magnesio se depositan en los tubos, formando una capa pétreo en sus paredes interiores, normalmente llamada incrustación. Esta incrustación actúa como aislante térmico, evitando una transferencia térmica adecuada entre la llama y el agua del interior de los tubos. Esto ayuda al consumo excesivo de combustible. La incrustación severa puede producir el sobrecalentamiento de los tubos y su rotura, lo que puede ser peligroso en la operación de la planta de calderas.

Hay dos tipos de dureza. Una denominada *dureza temporal* o agua dura temporal, que contiene grandes cantidades de bicarbonato cálcico,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Este agua puede ablandarse mediante ebullición, con lo que el carbonato cálcico precipitará fuera de la solución desprendiendo dióxido de carbono. En plantas industriales, el

agua se ablanda añadiendo cantidad suficiente de cal para precipitar el carbonato cálcico. Este lodo blando debe purgarse fuera de la caldera para evitar su depósito y precipitación en los calderines o colectores.

El agua que contiene sulfato de calcio y magnesio no se ablanda por ebullición y su dureza se denomina *permanente*. Puede ablandarse por adición de carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), de modo que los carbonatos cálcico y de magnesio precipitan.

El *proceso de ablandamiento frío por cal y sosa* trata agua bruta con cal, hidróxido de calcio (cal apagada) y sosa o carbonato sódico, para reducir parcialmente la dureza. El agua normalmente requiere un tratamiento mayor en calderas (véase la Figura 12.17a de la página siguiente).

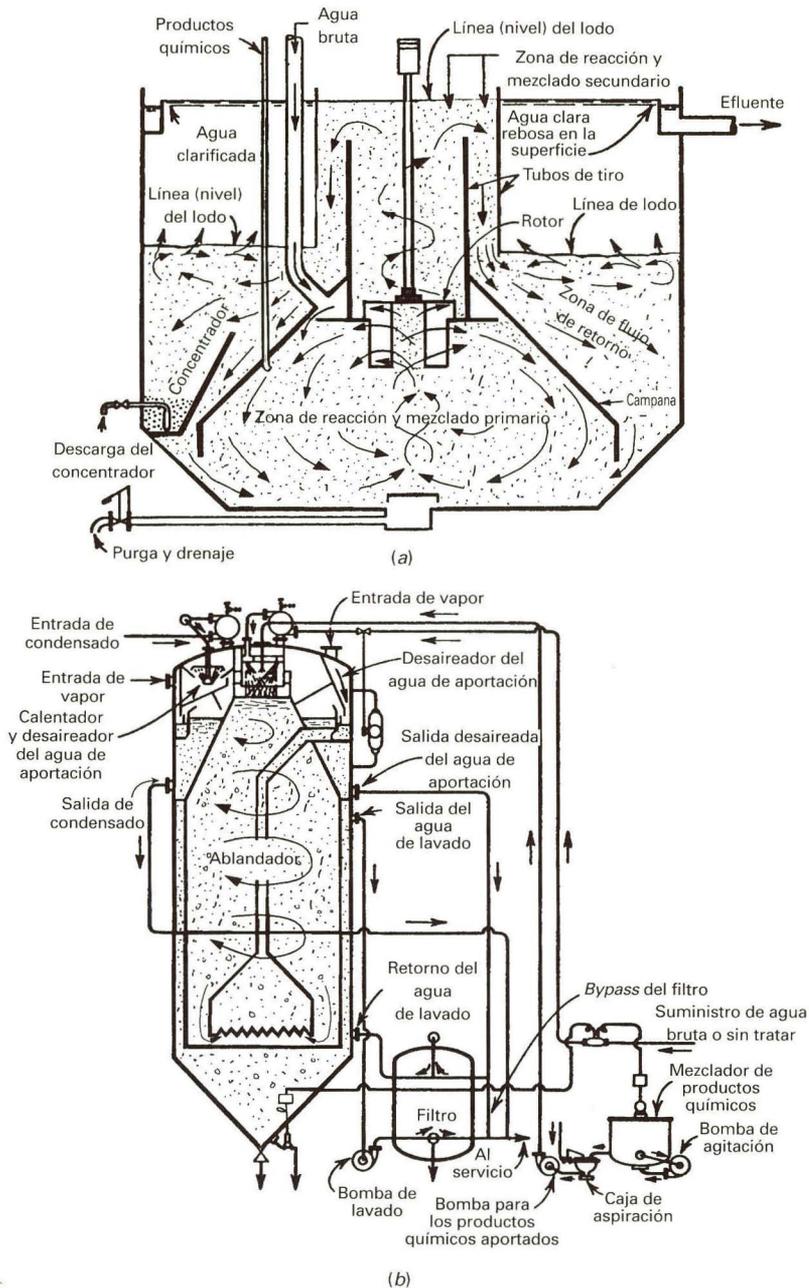
El *proceso de ablandamiento caliente por cal y sosa* opera a 212 °F (100 °C) y más, y utiliza vapor como fuente térmica. El calor produce una reacción química más rápida. En el método en caliente de ablandamiento, se utiliza también hidróxido cálcico, cal y sosa o carbonato sódico (Fig. 12.17b).

Por encima de 250 psi (17,5 kg/cm<sup>2</sup>) y a temperaturas elevadas, el carbonato sódico, que precipita con el tratamiento de cal, puede descomponerse en sosa cáustica (NaOH, hidróxido sódico) y liberar dióxido de carbono gaseoso, CO<sub>2</sub>; ambos son dañinos para los metales de la caldera. Otro factor importante es la gran cantidad de purga requerida para eliminar el carbonato sódico precipitado. El tratamiento del carbonato fue sustituido por el del fosfato, especialmente para calderas de alta presión.

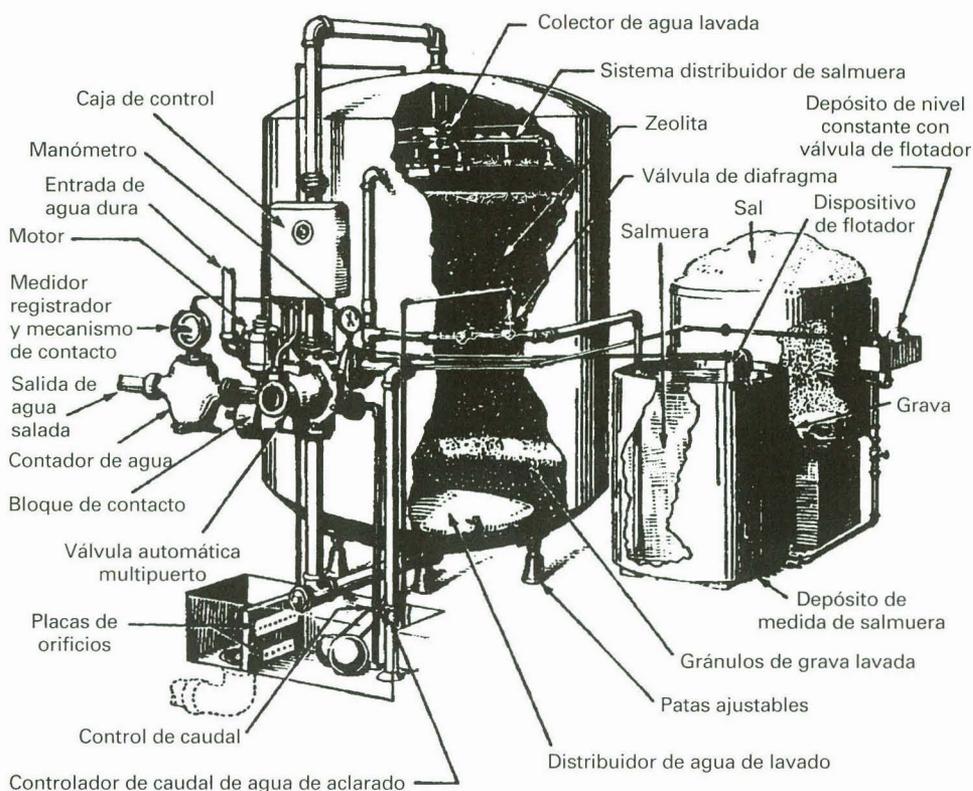
2. El *proceso de ablandamiento por zeolita* usa una sustancia de tipo arenoso llamada zeolita, que puede ser de origen natural o sintético. Esta sustancia se dispone en el interior de un depósito como si fuera un lecho filtrante (véase la Figura 12.18 de la página 513). La zeolita tiene la notable propiedad del intercambio básico. Cuando el agua dura pasa a través de un lecho de zeolita, los compuestos cálcicos y de magnesio pasan a la zeolita y son sustituidos por el sodio de la zeolita. El bicarbonato cálcico se convierte en bicarbonato sódico, y el sulfato de magnesio se convierte en sulfato de sodio. Estos compuestos sódicos no forman incrustación; de ese modo el intercambio iónico ablanda el agua al liberarla de sus compuestos «duros». Eventualmente la zeolita pierde su concentración sódica porque el sodio se combina con los compuestos de calcio y de magnesio y esto produce la pérdida de su poder de intercambio.

La *regeneración de la zeolita* implica su impregnación con una solución fuerte de salmuera (cloruro sódico). Una acción inversa produce el reemplazo del calcio y magnesio de la zeolita por el sodio de la salmuera. La Figura 12.18 muestra un ablandador de zeolita que utiliza control automático. En el ciclo de ablandamiento, el agua fluye hacia abajo a través del lecho de zeolita. A medida que la capacidad de ablandamiento de agua de la zeolita disminuye de su punto de consigna, unas válvulas automáticas cortan el flujo descendente de agua y lavan a contracorriente el material con el flujo y también eliminan la suciedad depositada. En la tercera etapa, una cantidad medida de salmuera salina común se admite por la parte superior del lecho. Después de un intervalo de tiempo, se introduce una corriente de agua de lavado para retirar el exceso de sal y limpiar la zeolita, tras de lo cual el lecho está listo para otro ciclo de ablandamiento.

En una aplicación para agua de calderas, el agua tratada por zeolita muestra una dureza nula mediante una prueba de jabón, pero el agua ahora tiene sales sódicas solubles en solución. Es necesaria la purga para limitar la concentración de estas



**Figura 12.17.** Antiguos tipos de ablandadores de agua. (a) Ablandador continuo frío por cal. (b) Ablandador caliente por cal que incorpora también una sección desaireadora para la eliminación de retorno del condensado, para la eliminación de gases no condensables. (Cortesía de Permutit Co.)



**Figura 12.18.** Ablandador de agua automático de tipo zeolita, muy común en antiguas plantas de vapor de baja presión.

sales, de forma que las espumas no tengan lugar en la caldera. Un elevado porcentaje de carbonato sódico puede causar fragilidad del acero bajo ciertas condiciones; así, los ablandadores de zeolita son más adecuados para tratar la dureza de sulfato de magnesio. Para eliminar la dureza de carbonatos, se utiliza la línea de tratamiento en caliente por cal delante del desendurecedor de zeolitas.

La cantidad de sal requerida para la regeneración depende del grado de dureza. La cifra normal es de 1/4 a 1/2 libras (0,113 a 0,227 kg) de sal por cada 1.000 galones (3.785,4 litros) de agua por *grano de dureza* (0,06 gramos). Por ejemplo, la regeneración de 50 ft<sup>3</sup> (1,3935 m<sup>3</sup>) de una zeolita sintética de alta capacidad requiere 300 libras (136 kg) de sal. Si el agua tiene una dureza de diez granos (0,6 gramos) y se requiere 1/4 libra (0,1134 kg) de sal por 1.000 galones (3785,4 litros), ¿cuántos galones de agua pueden ablandarse?

$$\text{Galones ablandados} = \frac{4 \times 300 \times 1.000}{10} = 120.000 \text{ galones (454.248 litros).}$$

El proceso químico de ablandamiento en caliente y ablandamiento por zeolita puede combinarse en un sistema de tratamiento de proceso en caliente-proceso de

zeolita en caliente que proporcionará, especialmente a las calderas de alta presión, un agua de alimentación caliente con dureza nula.

3. *Intercambio iónico* es el término aplicado al intercambio de calcio y magnesio por sodio, ya que los minerales, al ser iónicos en disolución natural, presentan carga eléctrica iónica. Los iones se clasifican además como de carga eléctrica positiva o negativa, siendo los iones positivos denominamos cationes y los iones negativos, aniones. Los cationes positivos en la forma iónica del calcio, magnesio, hierro y manganeso producen la dureza del agua. Utilizando el intercambio iónico, éstos iones de dureza se eliminan para ablandarse el agua y así reducir la incrustación en las calderas.

El método del intercambio iónico, utilizando intercambiadores iónicos nuevos y más versátiles, ha reemplazado los materiales originales y sintéticos de tipo zeolita.

El *intercambio iónico* en el tratamiento de agua está basado en el principio de que las impurezas que se disuelven en el agua se disocian en forma de partículas cargadas positiva y negativamente, conocidas como iones. Estas impurezas o compuestos se denominan electrólitos. Los iones positivos se denominan cationes porque emigran al electrodo negativo (cátodo) en una celda electrolítica. Las partículas negativas son los aniones porque son atraídos al ánodo. Estos iones existen por toda la disolución y actúan casi independientemente. Por ejemplo, el sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) se disocia en solución para formar iones positivos de magnesio e iones negativos de sulfato.

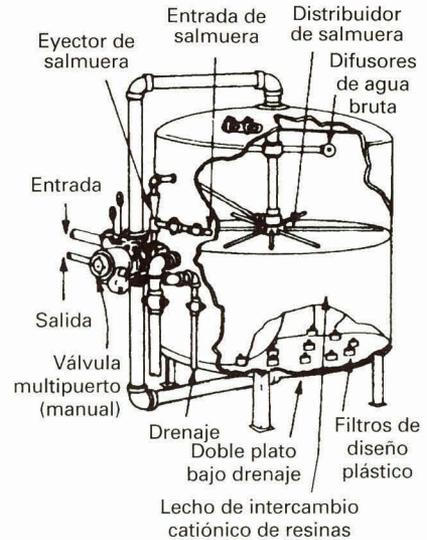
El material de intercambio iónico tiene la propiedad de intercambiar un ion por otro, tomándolo temporalmente en combinación química y dándolo a una solución regenerativa fuerte. El cuadro de la Figura 12.19a lista los intercambiadores iónicos y los productos químicos regenerantes normalmente utilizados en tratamiento de agua.

La Figura 12.19b muestra un ablandador de agua del tipo de intercambio iónico. El proceso de ablandamiento de agua utilizando el proceso de cambio iónico se realiza por medio del paso de agua dura a través de un lecho de resina sintética. Los iones formadores de dureza, el calcio y magnesio del agua, son eliminados del intercambiador por iones sodio no constituyentes de dureza que están agregados a la resina. Cuando todo el sodio de la resina se ha utilizado, el lecho de resina no mantiene la capacidad de ablandar el agua y debe regenerarse. Esto se hace pasando una cantidad de salmuera en exceso de cloruro sódico a través del lecho de resina para extraer el calcio y el magnesio y sustituir estos elementos por sodio. La salmuera se lava después fuera del lecho con agua, antes de volverla a poner en operación en el ciclo de ablandamiento.

4. Los *desmineralizadores* eliminan materias disueltas del agua pretratada de caldera por contacto del agua con intercambiadores de resinas iónicas. Éstas son burbujas esféricas de ácidos y bases insolubles formados por cadenas de polímeros con anillos o cadenas en cruz. Estas resinas eliminan los sólidos disueltos por un intercambio iónico, que deja iones inocuos en el agua. Las resinas pueden regenerarse para uso posterior por retrolavado, pero eventualmente deben reemplazarse por un lecho nuevo. Véase la Figura 12.20 de la página 516. La desmineralización de agua en ciertas industrias requiere que el agua esté completamente libre de sales minerales. Esto también se aplica al agua de calderas de centrales eléctricas. La destilación es un método, pero es costoso. El intercambio iónico es un método de dos etapas, siendo la primera el ciclo de hidrógeno, el intercambio *catiónico*, segui-

Materiales de intercambio iónico	Productos químicos regenerados
Cambiadores catiónicos:	
Ciclo del sodio:	
Arena verde natural	NaCl
Gel sintético	NaCl
Carbón sulfonatado	NaCl
Resina de estireno	NaCl
Ciclo de hidrógeno:	
Carbón sulfonatado	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Resina de estireno	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	HCl
Cambiadores aniónicos:	
Débilmente básico (amina alifática)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Débilmente básico (fenólica)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Débilmente básico (estireno)	NaOH
Fuertemente básico (tipo I)	NaOH
Fuertemente básico (tipo II)	NaOH

(a)



(b)

**Figura 12.19.** (a) Material de intercambio iónico y materiales de regeneración utilizados. (b) Intercambiador iónico de tipo catiónico.

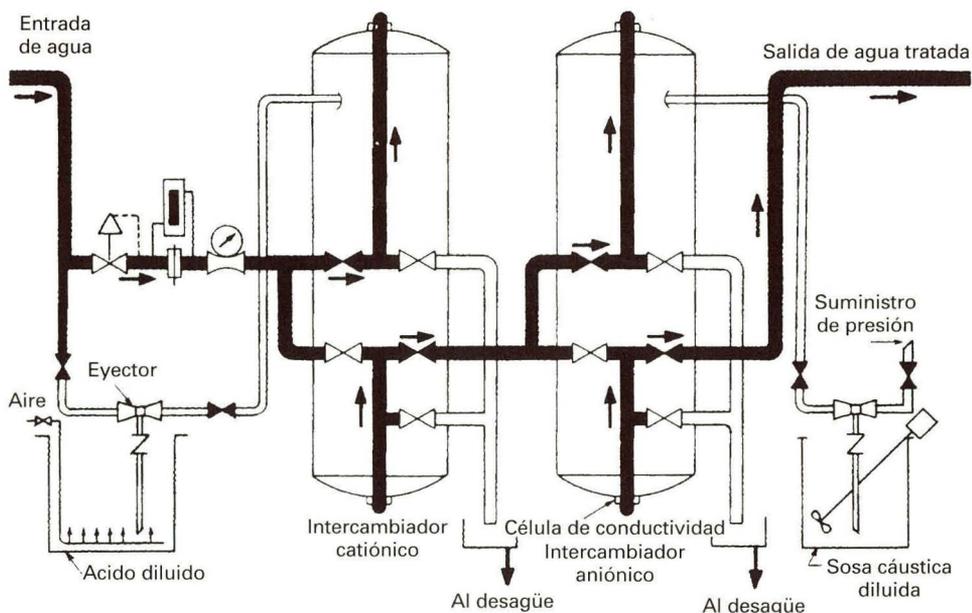
do por el segundo paso, el intercambio *aniónico*. Los cambiadores aniónicos se dividen en cambiadores aniónicos básicos fuertes y débiles. La unidad básica débil no eliminará ácidos débiles, como el carbónico o dióxido de silicio, y por tanto, el agua tratada puede contener sílice y carbono. Las resinas básicas débiles son regeneradas por álcalis tales como amoníaco, sosa cáustica o cenizas sódicas.

El cambiador básico fuerte puede eliminar ambos ácidos, fuertes y débiles, produciendo agua que esté libre de sílice y dióxido de carbono, pero es más costoso de operar. La regeneración se hace con sosa cáustica.

Los desmineralizadores se usan en plantas de calderas que trabajan a más de 1.000 psi (70 kg/cm<sup>2</sup>). Los desmineralizadores se parecen a los procesos de intercambio iónico. El intercambio catiónico se opera sobre el ciclo de hidróxido utilizando resinas especiales preparadas y saturadas con iones hidróxido. Los aniones salinos como el bicarbonato, carbonato, sulfato y cloruro se reemplazan por iones hidróxido. El efluente final consta básicamente de iones hidrógeno e iones hidróxido o agua pura.

En los *desmineralizadores de lecho mixto*, se mezclan los dos tipos de resinas juntas en un solo depósito. La regeneración en un lecho mixto puede llevarse a cabo porque las dos resinas pueden separarse hidráulicamente en lechos diferentes.

El *afinado del condensado* se usa para purificar el condensado retornado, y los desmineralizadores se utilizan en las centrales para eliminar los productos de la corrosión y los sólidos ionizados que provienen de las tuberías de conexión, turbinas, calentadores o condensadores. Esto aumenta la eficiencia de la turbina-generador, protege el ciclo de vapor de los efectos de la falta de estanqueidad del condensador y evita los depósitos dañinos o productos de la corrosión en las calderas.



**Figura 12.20.** Desmineralizador de dos lechos con intercambiador catiónico de hidrógeno e intercambiador aniónico que puede cambiar radicales ácidos para formar agua (anión básico débil) o anión básico fuerte que también elimina ácidos, sílice y dióxido de carbono. (Cortesía de Power magazine.)

En las aplicaciones del refinado de los condensados en centrales termoeléctricas, los caudales son muy grandes en comparación con el agua bruta de aportación, porque todo el vapor que va al turbogenerador se condensa y retorna a la caldera. Las impurezas principales a eliminar son óxidos metálicos denominados «crudos», sílice, diversos tipos de incrustaciones y fragmentos de resinas y medios filtrantes. Las resinas usadas en el intercambiador iónico o desmineralizador constan de un gel y de resinas macroporosas. Un sistema típico de regeneración tiene una vasija de separación catiónica y regeneración, una vasija de regeneración aniónica y un depósito de resinas mixtas.

La *desmineralización por membranas* es otro método que está recibiendo atención para eliminar impurezas del agua calderas. El tratamiento de una membrana consta de un paso de fluido presurizado a través de una membrana semipermeable, normalmente polimérica. En una filtración convencional de partículas, llamada macrofiltración, la corriente influente total pasa a través de los medios filtrantes dejando atrás las partículas. Éste es un campo de desarrollo que se concentra en el tipo de membranas, propiedades del material de las membranas, disposición y caudal de las membranas y sobre la pureza del agua resultante filtrada que puede esperarse del agua proveniente de varias fuentes. Las presiones de bombeo para accionar el agua y pasarla a través de las membranas pueden estar en el rango de 150 a 400 psi (de 10,5 a 28 kg/cm<sup>2</sup>) para aguas no salobres, y como mucho 1.000 psi (70 kg/cm<sup>2</sup>) para desalinización de agua de mar.

La tecnología de membranas está siendo combinada con los desmineralizadores, especialmente en plantas de generación nuclear, para reducir el carbono orgánico total en el agua tratada desde 2.000 a 3.000 ppb bajando hasta 2 a 20 ppb. El tratamiento por membranas gasta menos energía que el método evaporativo. Su utilización se incrementa en la producción de agua ultrapura para agua de aportación y está dirigida por este factor económico: menos coste para producir el agua de calidad deseada.

Los métodos descritos para acondicionar el agua de calderas son esencialmente métodos de tratamiento externos. El próximo capítulo está dedicado a la química del agua, pruebas y métodos de prueba del agua y tratamientos internos.

## **PREGUNTAS Y RESPUESTAS**

1. Una bomba de alimentación de caldera tiene una presión de descarga manométrica de 200 psi (14 kg/cm<sup>2</sup>) y entrega agua de densidad 62,3 lb/pie<sup>3</sup> a 1.250 gal/min a la carga tarada. Si el rendimiento mecánico de la bomba es del 85 por 100 y la altura de aspiración es despreciable, calcular la potencia hidráulica requerida y la potencia del motor necesarias para accionar la bomba.

RESPUESTA:

$$\text{Altura desarrollada} = \frac{200 \times 144}{62,3} = 462,3 \text{ pies (140,9 m)}$$

$$\text{Peso de 1 galón (3,7854 l) de agua} = \frac{62,3 \times 231}{1.728} = 8,216 \text{ lb/gal (0,9836 kg/dm}^3\text{)}$$

$$\text{Peso del agua por minuto} = 1.250 \text{ gal/min} \times 8,216 \text{ lb/gal} = 10.270 \text{ lb/min (4.658 kg/min)}$$

$$\text{Potencia hidráulica} = \frac{10.270 \times 462,3}{33.300} = 143,9 \text{ hp}$$

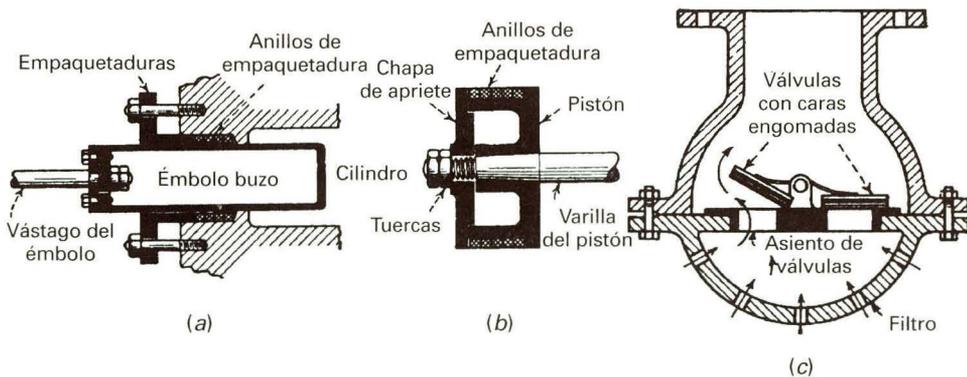
$$\text{Potencia del motor} = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Rendimiento}} = \frac{143,9}{0,85} = 169,25 \text{ hp}$$

2. ¿Qué medio se utiliza en los sopladores de hollín instalados permanentemente?

RESPUESTA: El medio de limpieza utilizado puede ser vapor sobrecalentado seco y aire comprimido, dependiendo del diseño de la caldera y el equipo de soplado de cenizas. El soplado de cenizas se lleva a cabo mejor con presión negativa en el hogar para evitar que la ceniza entre en la sala de calderas a través de los cierres o ajustes con pérdidas.

3. ¿Cuál es la diferencia entre una bomba de émbolo buzo y una bomba tipo pistón?

RESPUESTA: (Véase la Figura 12.21 de la página siguiente.) En la bomba de émbolo buzo, este émbolo no tiene segmentos o empaquetaduras en el cilindro, sino que se mantiene estanco contra las fugas de agua pasando a través del cilindro con su empaquetadura encajada como se ve en la Figura 12.21. En contraste, la bomba de pistón tiene el pistón entero dentro del cilindro y tiene segmentos o empaquetaduras alojados en las ranuras del pistón (circunferencialmente) y éstas se mantienen en su lugar mediante un plato



**Figura 12.21.** (a) Una bomba de émbolo buzo tiene caja de empaquetadura exterior. (b) Una bomba de pistón tiene anillos o segmentos de cierre (empaquetadura) alrededor del pistón. (c) La válvula de pie tiene filtro y actúa como válvula de retención en el lado de aspiración de la bomba.

final de apriete, como se ve en la Figura 12.21. Nótese que una ventaja del émbolo buzo es que la empaquetadura puede sustituirse sin tener que abrir el cilindro como ocurre en el caso de la bomba de pistón.

4. ¿Cuál es la función de una válvula de pie?

RESPUESTA: (Véase la Figura 12.21.) La función de la válvula de pie es doble: (1) Actuar como válvula de comprobación en dos direcciones, cuando el agua es aspirada en un tubo de aspiración de una bomba hidráulica y evitar que el agua retroceda de la tubería de aspiración de la bomba. (2) Como muestra la Figura 12.21, se incorpora también un filtro en la válvula de pie para evitar que objetos extraños entren en la aspiración de la bomba. Otra ventaja de una válvula de pie es que mantiene la línea de aspiración de la bomba encima de la válvula llena de agua, haciendo más fácil para la bomba arrancar con agua en el lado de aspiración.

5. ¿Cuál es el diámetro del cilindro de agua de una bomba alternativa que tiene la siguiente marca de chapa:  $10 \times 18 \times 12''$ ?

RESPUESTA: El cilindro de agua es de  $18''$ . El tamaño del cilindro de vapor está siempre listado en primer lugar, siendo de  $10''$ , mientras la carrera de  $12''$  está listada en último lugar.

6. Una bomba de agua simplex de  $8 \times 4 \times 10''$  opera a  $125 \text{ psi}$  ( $8.75 \text{ kg/cm}^2$ ) de presión de vapor. ¿Qué presión de agua teórica puede desarrollar?

RESPUESTA: Igualado el área del pistón multiplicada por la presión del vapor al área del pistón de agua por la presión de agua y resolviendo para la presión de agua como sigue con  $\pi/4 = 0,7854$ :

$$\begin{aligned} \pi/4 \cdot 8^2 \cdot 125 &= \pi/4 \cdot 4^2 P_w \\ P_w &= \frac{64 \cdot 125}{16} = 500 \text{ psi (35 kg/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

7. ¿Cuántos galones de agua bombeará una bomba de tamaño  $6 \times 4 \times 6''$ , dúplex de doble acción, que bombea a 80 carreras por minuto, si el rendimiento total de la bomba de agua es del 85 por 100?

RESPUESTA: 1 galón = 231 pulgadas<sup>3</sup>. Dúplex = dos cilindros de agua bombeando. Doble acción = bombeo por ambos lados del pistón. Por tanto, el volumen en pulgadas<sup>3</sup> bombeado por el lado agua de la bomba es:

$$\text{Volumen} = \pi/4 \cdot 4^2 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 80 \cdot 0,85 = 20.508 \text{ pulgadas}^3 \text{ (554 m}^3\text{/min)}$$

$$\text{Galones} = 20.508/231 = 89 \text{ gpm.}$$

8. ¿Qué significa el término *placa* (o plato) *de válvulas*?

RESPUESTA: Una placa o plato de válvula es la placa que contiene las válvulas bien de aspiración o bien de descarga de una bomba de acción directa (o de desplazamiento positivo).

9. ¿Qué significan los términos *límite de aire* y *límite de vapor*?

RESPUESTA: Límite de aire indica el aire que está entrando en el lado de aspiración de la bomba incapacitando su capacidad de bombeo para aspirar agua en el lado de aspiración de la bomba. Límite de vapor indica que el agua está demasiado caliente para la aspiración de la bomba y que se vaporiza instantáneamente («flasheado») con reducción de la presión. El límite de aire normal requiere ventear la bomba y después cebarla con agua para comenzar el bombeo. La vaporización instantánea puede causar daño por parada de bomba, por vibración y por cavitación. Comprobar los límites superiores previsibles de temperatura para el agua, cómo hayan sido establecidos por el fabricante de la bomba y no exceder estos límites.

10. ¿Qué puede producir golpeteo en una bomba alternativa de tipo vapor?

RESPUESTA: Hay varios elementos que pueden producir este efecto: (1) El condensado en las líneas de vapor o en el cilindro de vapor. Drene ambos, especialmente en el arranque, para evitar que un cilindro o pistón sean golpeados o se pueda producir otro daño interno en el lado de vapor de la bomba. (2) Asegurarse de que no hay aire en el lado de agua de la bomba. Use las válvulas o grifos de venteo y, si es preciso, cebe la bomba. (3) Asegurarse de que no hay válvulas cerradas en el lado de aspiración o de impulsión de la bomba y de que el agua está fluyendo adecuadamente y sin obstrucciones. (4) Compruebe el funcionamiento de las válvulas para asegurarse de que no existe pérdida de movimiento. Y (5) revise todas las conexiones, vástagos de émbolo, cojinetes y piezas semejantes con desgaste excesivo.

11. ¿Qué son el deslizamiento de una bomba y su rendimiento o eficacia volumétrica?

RESPUESTA: El deslizamiento de una bomba es la *diferencia* entre el desplazamiento de volumen de una bomba alternativa, que se calcula como el volumen de descarga teórica y el volumen real descargado por la bomba. El deslizamiento se expresa como un porcentaje del desplazamiento teórico, y tiene valores en el rango del 3 al 15 por 100. La eficiencia volumétrica es la relación del volumen de agua realmente entregado y el del desplazamiento teórico de la bomba.

12. Una bomba centrífuga está trabajando con una presión de aspiración de 60 psi ( $0,42 \text{ kg/cm}^2$ ) y una presión de descarga de 200 psi ( $14 \text{ kg/cm}^2$ ). ¿Cuál sería la altura (presión) total en esta bomba si la altura (presión) de fricción y velocidad totalizan 25 pies?

RESPUESTA: El incremento neto de presión realizado por la bomba es de  $200-60 = 140$  psi ( $9,8 \text{ kg/cm}^2$ ). Transformándolo en pies:  $140/0,434 = 323$  pies y, en total,  $323 + 25 = 348$  pies.

13. Una bomba de vapor condensado de un turbogenerador de 50.000 kW tiene una altura (presión) de fricción y externa de 60 pies (18,3 m) y una altura de aspiración de 29,5". La turbina tiene una tasa de vapor de 12 lb/kWh. La altura de velocidad para la bomba del condensador es de sólo 1/2 pie. ¿Cuál es el caudal en galones por minuto a través de la bomba y la potencia teórica requerida por la bomba?

RESPUESTA: Es necesario convertir en unidades manejables, para su utilización en las ecuaciones de la bomba. Convirtiendo la tasa de vapor de la turbina en caudal de vapor obtendremos:  $50.000 \times 12 \text{ Lb/kWh} = 600.000$  libras/hora de vapor =  $272,16 \text{ m}^3/\text{hora}$ , o bien =  $272 \cdot 160/60 \cdot 3 \cdot 78 = 1.198$  gpm.

Para la altura de aspiración, la *presión de vacío* (o *vacío*) en los condensadores se mide en pulgadas de mercurio (o cm de mercurio) y será de:  $29,5'' \times 2,54 = 74,93$  cm de mercurio; una atmósfera: 76 cm de mercurio: 10,33 mCA. Convirtiendo a pies de agua =  $14,455 \times 2,31 = 33,4$  pies de altura de aspiración, o en unidades métricas =  $74,93/76 \times 10,33 = 10,18$  mCA = 33,41 pies.

2) La altura o presión externa es de 60 pies = 18,29 mCA.

3) La altura de velocidad es de 1/2 pies = 0,15 mCA.

Altura total  $60 + 33,4 + 0,5 = 93,9$  pies = 28,62 mCA.

Y la potencia hidráulica teórica será:  $W = 28,85$  HP, ya que el caudal de vapor: caudal de agua condensada ( $W = Q \cdot H = 4.576 \frac{\text{kg}}{60'' \text{ min}} \times \frac{28,62 \text{ m}}{76 \text{ kgm/m}} = 28,4$  HP).

14. Una bomba alternativa tiene la siguiente información de placa:  $12 \times 6 \times 14''$ . ¿Cuál es el tamaño del cilindro de vapor y, si la bomba está trabajando a 90 carreras por minuto, cuáles son la velocidad del pistón y la carrera total del pistón en pies/min?

RESPUESTA: La primera cifra indica el diámetro del cilindro de vapor: 12" (304,8 mm). La carrera es de 14" (355,6 mm); por tanto, la velocidad en pies por minuto es  $14/12 \times 90/2 = 52,5$  pies/min. Y la distancia (carrera total) del pistón será:  $52,5 \times 2 = 105$  ft/min.

15. Una bomba centrífuga diseñada para velocidad variable está tarada para una velocidad máxima de 3.500 rpm. A 2.000 rpm, la bomba genera una altura total de 600 psi ( $42 \text{ kg/cm}^2$ ). ¿Qué altura total se desarrollaría a 3000 rpm?

RESPUESTA: Utilizando las leyes de las bombas centrífugas, la altura total varía como la velocidad al cuadrado:

$600 \text{ psi}: 42 \text{ kg/cm}^2 = 42 \times 10,3 = 432,6 \text{ mCA} = 1.442 \text{ pies} = H$  o bien  $600 \text{ psi} = 1.386 \text{ pies} = 415,8 \text{ mCA}$

La presión o altura será de:  $600 \times 3.000^2 / 2.000^2 = 1.350$  psi o bien:

$$\frac{1.386 \times 3.000^2}{2.000^2} = 3.118,5 \text{ pies} \approx 3.192 \text{ ft}$$

16. ¿Cómo fuerza un inyector al agua contra la presión de la caldera cuando usa vapor a la misma presión?

RESPUESTA: Porque a causa del Venturi o sección restringida de la tobera, la elevada velocidad del vapor arrastra, haciendo vacío, las gotitas de agua de forma que su cantidad de movimiento induce o introduce el caudal en la caldera.

17. ¿Cuál es el propósito del ventilador de tiro forzado y el de tiro inducido?

RESPUESTA: El ventilador de tiro forzado suministra aire al espacio de combustión. El de tiro inducido arrastra los gases y productos de combustión y los entrega a la conexión inferior de la chimenea.

18. ¿Qué disposición se desea por seguridad entre el ventilador de tiro inducido y el de tiro forzado?

RESPUESTA: Una ubicación de modo que el ventilador de tiro forzado no pueda operarse con el ventilador de tiro inducido cerrado; de otro modo, el fuego o llama sería soplado fuera de las puertas y mirillas de observación.

19. ¿Cuáles son algunas de las causas de vibración de un ventilador o soplador?

RESPUESTA: La vibración puede estar producida por: (1) rodamientos desgastados o poco lubricados; (2) un cojinete de empuje defectuoso; (3) excesivos depósitos en los álabes; (4) álabes desequilibrados; (5) piezas rotativas que rozan o se ajustan demasiado a piezas fijas; (6) unidad del ventilador desalineada con el motor o transmisión del accionamiento; (7) eje flexado o alguna pieza flexionada; (8) unidad suelta de sus cimentaciones; (9) un lado del ventilador gira en caliente más que el otro lado, produciendo desalineamiento; y (10) grietas en algún elemento rotatorio.

20. ¿Cómo se mide el tiro?

RESPUESTA: En las condiciones de flujo del aire y de los gases el tiro se mide en pulgadas (o cm) de columna de agua mediante instrumentos tales como manómetros, en los que un lado de un tubo en U está conectado al conducto u hogar en el que se quiere medir el tiro, y el otro está conectado a la atmósfera o a la entrada del conducto. La diferencia en el nivel de agua en las dos columnas indica las pulgadas (o cm) de tiro, que es una medida de la diferencia de presión.

21. El aire fluye por un conducto de  $24 \times 30''$  con una velocidad media de 20 pies/segundo cuando su presión estática es de 0,75" de agua. El aire está a 50 °F y pesa 0,07788 libras/pie<sup>3</sup>, mientras la temperatura del agua en el termómetro es de 60 °F y pesa 62,34 libras/pie<sup>3</sup>. ¿Cuál es la presión total del aire en el conducto y el volumen del flujo (caudal) en pies cúbicos por minuto?

RESPUESTA: Hay que utilizar la ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{2gDh_v}{12d}}$$

donde:  $V = 20 \text{ pies/s} = 6 \text{ m/s}^2$   
 $g = 32,17 \text{ pies/s} = 9,81 \text{ m/s}^2$   
 $D$  (densidad agua) =  $62,34 = 1 \text{ kg/dm}^3$   
 $d$  (densidad aire) =  $0,07788 = 1,29 \text{ kg/m}^3$

Y resolviendo para  $h_v$  = altura de velocidad:

$$20 = \sqrt{\frac{2(32,17) \cdot 62,34 h_v}{12 \times 0,07788}}$$

Así,  $h_v = 0,305$  pulgadas de agua. La presión total es la suma de la estática y la dinámica:

$$P_t = 0,75 + 0,305 = 1,055'' \text{ de agua}$$

El caudal:  $Q = \text{sección} \times \text{velocidad media}$ , o sea:

$$Q = \frac{24 \times 30}{144} \times 20 = 100 \text{ ft}^3/\text{s} = 6.000 \text{ ft}^3/\text{min} \text{ (} 2,83 \text{ m}^3/\text{s)}$$

Presión estática =  $0,75 \times 25,4 \text{ mmCA} = 19,05 \text{ mmCA}$   
 Presión total =  $19,05 + 2,42 = 21,47 \text{ mmCA}$   
 Presión dinámica ( $H_v$ ) =  $2,42 \text{ mmCA}$

$$V = \sqrt{\frac{2gP}{\gamma}} = \sqrt{\frac{19,62 \text{ m/seg}^2 \cdot h_v \cdot 1 \text{ kg/m}^3/1.000}{1,3 \text{ kg/m}^3}} = 6,04 \text{ m/seg}$$

$$V = 604 \text{ m/s}$$

$$\left. \begin{array}{l} 24'' = 609,6 \text{ mm} \\ 30'' = 762 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Área} = 0,6096 \times 0,762 \text{ m}^2 = 0,4645 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal} = \text{Área} \times \text{Velocidad} = 0,4645 \text{ m}^2 \times 6 \text{ m/seg} = 2,787 \text{ m}^3/\text{seg} = 167,72 \text{ m}^3/\text{min}$$

22. ¿Cuáles son algunas de las condiciones que pueden impedir a una turbina de vapor desarrollar su potencia plena?

RESPUESTA: Pueden ser las siguientes: la máquina está sobrecargada, la presión y temperatura iniciales no son las condiciones de diseño, la presión de escape es demasiado elevada, el regulador está ajustado demasiado bajo, el filtro de vapor está obstruido, la tobera de la turbina está cerrada por depósitos e incrustaciones y hay un desgaste interno entre toberas y álabes.

23. ¿Por qué es necesario abrir los drenajes de la cubierta y purgar en la línea de vapor que va a la turbina cuando se va a arrancar la turbina?

RESPUESTA: Para evitar llenar con agua condensada las toberas y álabes dentro de la turbina durante el arranque; esto puede romper estas piezas por impacto. Los álabes están diseñados para trabajar con vapor, no con agua.

**24.** ¿Qué es un ciclo regenerativo?

RESPUESTA: En el ciclo regenerativo, el agua de alimentación se pasa a través de una serie de calentadores del agua de alimentación y se calienta con vapor extraído de las etapas de una turbina de vapor. Esto eleva la temperatura del agua de alimentación hasta cerca de la temperatura del agua de la caldera, aumentando así la eficiencia o rendimiento térmico del ciclo.

**25.** ¿Cuáles son algunos de los problemas comunes en la operación del condensador de superficie?

RESPUESTA: La mayor preocupación del operador es la pérdida del vacío producido por una fuga en el condensado superficial a través de las juntas o empaquetaduras. Otro problema puntual es la pérdida de agua de refrigeración en el espacio de vapor a través de los finales de los tubos o a través de diminutos orificios en éstos. Los tubos pueden también cerrarse con lodos, suciedad, algas, desperdicios, etc., impidiendo así el suministro de agua de refrigeración, o pueden estar recubiertos de aceite lubricante proveniente de la máquina alternativa. También la corrosión y la pérdida de la capa de zinc del tubo metálico son problemas normales de los condensadores de superficie. La corrosión puede ser uniforme o puede manifestarse en forma de pequeños orificios o picaduras. La falta de zinc cambia la naturaleza del metal y produce desgaste y fragilidad.

**26.** ¿Dónde buscaría un defecto si el inyector de aire no produce suficiente vacío?

RESPUESTA: En este caso, el problema está normalmente en la tobera. Usted probablemente encontrará que: (1) la tobera está erosionada; (2) el filtro protector de la tobera está obstruido; o (3) la presión de vapor en la tobera es demasiado baja.

**27.** ¿Cuáles son las causas principales de la vibración de la turbina?

RESPUESTA: La vibración de la turbina está producida por: (1) piezas desequilibradas; (2) mala alineación de las piezas; (3) piezas sueltas; (4) piezas que rozan; (5) problemas de lubricación; (6) problemas con el vapor; (7) problemas en las cimentaciones; y (8) piezas rotas o desgastadas en exceso.

**28.** ¿Cuál es el origen que más prevalece de entrada de agua en un turbogenerador de vapor?

RESPUESTA: Las fugas de agua de los tubos en los calentadores de agua de alimentación de la caldera que tiene vapor en el lado de la envolvente suministrado por las líneas de extracción de la turbina. El agua a presiones altas puede retroceder a la turbina debido a que el vapor de extracción está a menor presión. Se necesitan válvulas unidireccionales en la línea de extracción de vapor para evitar este retroceso de agua a la turbina.

**29.** ¿Qué significa la tasa de agua de una turbina?

RESPUESTA: Es la cantidad de agua (vapor) utilizada por la turbina en libras por caballo de vapor por hora o kilovatios por hora.

**30.** ¿Cuáles son los tres tipos de condensadores?

RESPUESTA: (1) Superficiales (tubulares y envolvente); (2) de chorro o eyector; y (3) barométricos.

31. ¿Por qué hay una válvula de seguridad sobre el *casing* o envolvente de una turbina?

RESPUESTA: El *casing* o cubierta de la turbina está conectado a válvulas de seguridad de carga por resorte o muelle para evitar daños por excesiva presión del vapor en el lado de baja presión, por si la válvula de escape se cierra accidentalmente. Algunos *casings* sobre turbinas pequeñas están conectados con una válvula centinela que sólo sirve para alertar al operador de sobrepresión en el escape. La válvula cargada a resorte es necesaria para descargar las presiones elevadas.

32. ¿Cuál es la diferencia entre un calentador de agua de alimentación abierto o cerrado?

RESPUESTA: El calentador abierto pone al vapor a baja presión en contacto directo con el agua y trabaja a la presión atmosférica o ligeramente por encima de ella. El calentador de agua de alimentación cerrado consta de una carcasa y tubos con contacto indirecto entre el vapor y el agua y puede operar a alta presión.

33. ¿Cuál es la diferencia principal entre el objeto y la función de un desaireador y un calentador abierto de agua de alimentación?

RESPUESTA: El calentador abierto reduce el contenido de oxígeno calentando el agua de alimentación a 212 °F (100 °C), venteando el contenido a la presión atmosférica. El calentador desaireador elimina prácticamente todo el oxígeno por calentamiento del agua de alimentación con vapor de alrededor de 30 psi (2,1 kg/cm<sup>2</sup>) o más. Su carcasa ventea a presión a través de un venteo de condensador y bomba de vacío.

34. ¿Qué factores determinan la eficacia de colección de un precipitador?

RESPUESTA: El tiempo de retención de gases de combustión, cantidad de energía eléctrica suministrada al sistema de descarga del precipitador, tamaño de las partículas o cenizas volantes y la resistencia del polvo al flujo.

35. Cite tres tipos de fibras sintéticas usadas en los filtros de mangas.

RESPUESTA: El factor limitador de los filtros o colectores de mangas ha sido el desgaste rápido o la incapacidad para resistir temperaturas y corrosividad de los gases de combustión. El desarrollo de fibras sintéticas como los poliésteres, acrílicos y fibras de vidrio ha aumentado la aplicación de estos filtros.

36. ¿Qué se entiende por corrosión a baja temperatura en una caldera?

RESPUESTA: La corrosión de baja temperatura tiene lugar cuando los gases de combustión entran en contacto con superficies que están a una temperatura por debajo del punto de rocío de los constituyentes corrosivos que están en los gases. Estas bajas temperaturas se encuentran en la entrada del agua de los economizadores, si la temperatura del agua de alimentación es demasiado baja, y en el final frío de un calentador de aire. También puede ocurrir en calderas escocesas marinas sujetas a funcionamiento todo-nada y en ciclos de purga de los hogares. Las temperaturas bajas pueden formar azufre y otros gases corrosivos que dan lugar a ácido sulfuroso y sulfúrico que atacan las partes metálicas de las calderas.

37. Cite las impurezas que producen incrustaciones duras y blandas y corrosión en las calderas.

RESPUESTA: La incrustación dura es producida por sulfato cálcico, silicato cálcico, silicato magnésico y sílice. La incrustación blanda es producida por bicarbonato cálcico,

carbonato cálcico, hidróxido cálcico, bicarbonato de magnesio, carbonato de hierro y óxido de hierro. La corrosión se produce por oxígeno, dióxido de carbono, cloruro de magnesio, sulfato ácido, sulfato de magnesio, cloruro cálcico, nitrato de magnesio, nitrato cálcico, cloruro sódico y ciertos aceites y materia orgánica.

38. ¿Cómo puede una impureza disuelta abandonar esa disolución y precipitarse en forma sólida?

RESPUESTA:

1. Por un aumento de temperatura, reduciéndose la solubilidad del sólido en el agua.
2. Por sobrepasar el punto de saturación de las impurezas disueltas en el agua. El agua puede mantener en disolución una cantidad limitada de impurezas disueltas, por ello la concentración es importante.
3. Por cambios químicos de la impureza por el calor, produciendo rotura y formación de sustancias insolubles.

39. ¿Cuál es el compuesto químico clave en la dureza temporal del agua?

RESPUESTA: El bicarbonato cálcico,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

40. ¿Qué dos métodos se usan para ablandar agua con dureza temporal?

RESPUESTA: La dureza temporal del agua puede eliminarse *hirviendo* el agua, con lo que el carbonato cálcico precipita como lodo blando y libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La dureza temporal puede eliminarse *añadiendo cal* en cantidad adecuada, que, con el carbonato cálcico, precipita y produce agua como subproducto de la reacción química.

41. ¿Qué compuestos químicos en el agua producen dureza permanente?

RESPUESTA: Sulfato cálcico y sulfato de magnesio.

42. ¿Cómo se ablanda el agua dura?

RESPUESTA: La dureza permanente puede ablandarse por la adición correcta de carbonato sódico o pasando el agua por un ablandador de zeolita.

43. ¿Qué es la clarificación?

RESPUESTA: Clarificación es la eliminación de materia en suspensión y/o color del suministro de agua. La materia en suspensión puede consistir en partículas grandes que sedimentan con facilidad. En estos casos, el equipo de clarificación básicamente implica el uso de piletas de sedimentación y/o filtros. Sin embargo y más a menudo, la materia en suspensión en el agua consta de partículas tan pequeñas que no sedimentan e incluso pasan a través de los filtros. La eliminación de estas sustancias pequeñas o coloidales requiere la utilización de coagulantes.

44. ¿Qué es la coagulación?

RESPUESTA: La coagulación es la agrupación de impurezas divididas finamente o coloidales en el agua, en masas que sedimentan rápidamente y/o pueden filtrarse fuera del agua. Las partículas coloidales tienen una gran superficie que las mantiene en suspensión; además, las partículas tienen cargas eléctricas negativas que las inducen a repeler-

se entre ellas y a resistirse a su agrupación. La coagulación, sin embargo, implica neutralizar las cargas negativas y suministrar un núcleo para que las partículas en suspensión se adhieran a él.

45. ¿Qué tipos de coagulantes se utilizan?

RESPUESTA: Los coagulantes más comunes son las sales de hierro y aluminio, tales como el sulfato ferroso, cloruro de hierro, sulfato de aluminio y aluminato de sodio. Los iones de hierro y aluminio tienen tres cargas positivas; además, su efectividad está relacionada con su capacidad para reaccionar con las partículas coloidales cargadas negativamente. Con una utilización adecuada de estos coagulantes, se forma un floculo en el agua que sirve de red para agrupar la materia en suspensión. En estos últimos años se han desarrollado más materiales sintéticos llamados polielectrólitos para estos propósitos de coagulación. Constata de moléculas grandes, tipo cadena, con carga positiva. En algunos casos, los polímeros orgánicos y algunos tipos especiales de arcillas se usan en procesos de coagulación para servir como ayuda en estos procesos. Esta ayuda a la coagulación sirve para hacer al floculo más pesado, produciendo una sedimentación más rápida.

46. ¿Qué es la precipitación química?

RESPUESTA: En los procesos de precipitación, los productos químicos añadidos reaccionan con la materia disuelta en el agua para producir un producto de reacción relativamente insoluble. Los métodos de precipitación se usan para reducir la dureza disueltas, la alcalinidad y, en algunos casos, la sílice. El ejemplo más normal de precipitación química en el tratamiento de agua es el ablandamiento con cal y sosa.

47. ¿Qué es el intercambio iónico?

RESPUESTA: Cuando los minerales se disuelven en agua, forman partículas cargadas eléctricamente llamadas iones. El carbonato cálcico, por ejemplo, forma un ion calcio con carga positiva (catión) y un ión carbonato con carga negativa (anión). Ciertos materiales naturales y sintéticos tienen la capacidad de eliminar iones minerales del agua en intercambio con otros. Por ejemplo, al pasar el agua por un simple desendurecedor de intercambio catiónico, todos los iones calcio y magnesio son eliminados y reemplazados por iones sodio. Los materiales de intercambio iónico normalmente se suministran en forma de pequeñas cuentas o cristales que componen un lecho de varios pies de profundidad a través del cual pasa el agua.

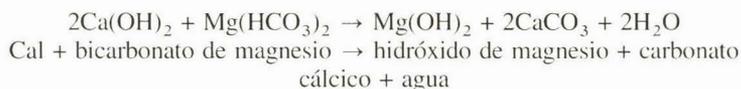
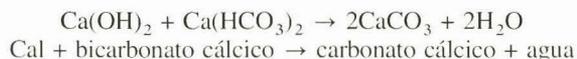
48. ¿Qué es la desmineralización?

RESPUESTA: Ésta implica el paso del agua a través de los materiales de intercambio catiónico y aniónico. El proceso de intercambio catiónico se opera sobre la base del ciclo de hidrógeno. Esto es, el hidrógeno se sustituye por todos los cationes. El intercambiador aniónico opera sobre el ciclo hidróxido que reemplaza el hidróxido por todos los aniones. El efluente final de este proceso consta básicamente de iones hidrógeno e iones hidróxido o agua.

El proceso de desmineralización puede tomar varias formas. En el proceso de lecho mixto, los materiales de intercambio aniónico y catiónico están mezclados íntimamente en la unidad. Las disposiciones de lechos múltiples pueden constar de varias combinaciones de lechos de intercambio, basados en lechos de intercambio débiles y fuertes, de base aniónica y desgasificador.

49. ¿Cómo reacciona la cal en el proceso de ablandamiento?

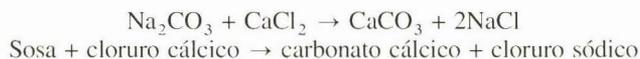
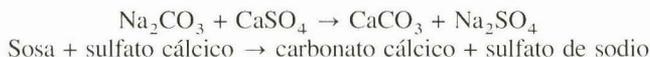
RESPUESTA: La cal hidratada (hidróxido de calcio) reacciona con el bicarbonato cálcico soluble y el bicarbonato de magnesio para formar precipitados insolubles. Esto se refleja en las siguientes ecuaciones:



La mayoría del carbonato cálcico e hidróxido de magnesio sale fuera de la solución como lodo y puede ser eliminada por sedimentación y filtración. La cal (apagada) además puede utilizarse para reducir la dureza presente en forma de bicarbonato (dureza temporal) así como para disminuir la alcalinidad del bicarbonato en agua. La cal apagada reacciona con el sulfato y el cloruro de magnesio y precipita hidróxido de magnesio, pero en este proceso se forman sulfato cálcico y cloruro de calcio. La cal apagada no es efectiva para eliminar sulfato y cloruros de calcio.

50. ¿Cómo reacciona la sosa en el proceso desendurecedor?

RESPUESTA: La sosa (carbonato sódico) se utiliza principalmente para reducir la dureza que no sea de bicarbonato (también llamada dureza permanente o de sulfatos). Reacciona de la siguiente manera:



El carbonato cálcico formado en la reacción tiende a salir fuera de la solución en forma de lodo. El sulfato sódico y el cloruro sódico son altamente solubles y no forman incrustaciones.

51. ¿Cuál es el propósito de la purga y la diferencia entre purga de superficie y purga intermitente o purga de fondo?

RESPUESTA: La purga tiene por objeto eliminar los sólidos precipitados, suciedad, lodo y otros materiales indeseables del agua de caldera o recipientes que tratan el agua externamente a la caldera. La purga de superficie se usa en las calderas grandes para desnatar o desespumar las impurezas o lodos de la parte superior del agua de caldera. La eliminación continua de una pequeña corriente de agua de la parte superior del nivel de agua de la caldera mantiene la concentración de impurezas en caldera a un nivel constante.

La purga de fondo, a períodos de tiempo intermitentes, se necesita para eliminar lodos y depósitos del fondo de calderín, virola (en las de hogar interior) o calderines de lodos. La purga de fondo se lleva a cabo manualmente por el operario de caldera y la frecuencia dependerá del tipo de caldera, tamaño, presión y uso del vapor. Puede también verse influida por el tipo de tratamiento de agua que se utilice. Para calderas industriales, el ablandamiento se hace sobre la base de cuatro a ocho horas durante los períodos de baja producción de vapor.

## 52. ¿Qué es la turbidez aplicada al agua de caldera?

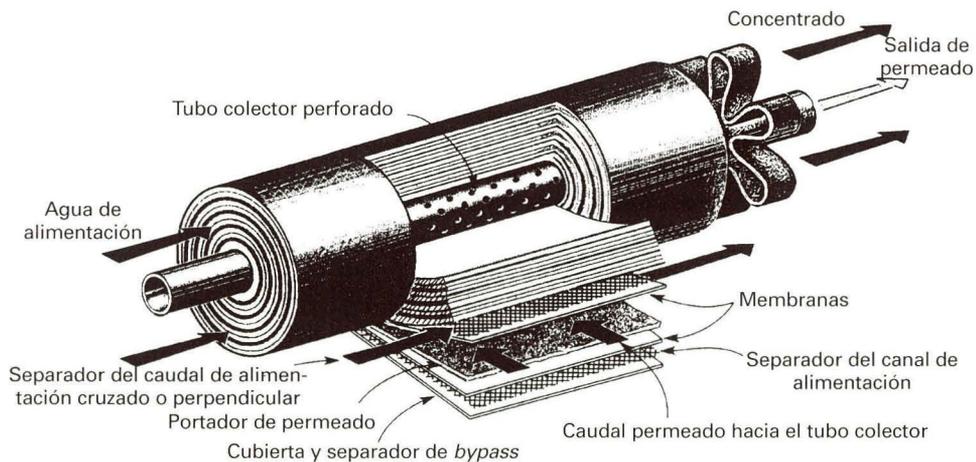
RESPUESTA: Turbidez es un término que se usa para describir los sedimentos existentes en el agua que son partículas bastas que sedimentan rápidamente o se decantan fuera del agua. Su concentración se expresa en partes por millón (ppm). Esta concentración se reduce a niveles aceptables por filtración o por sedimentación natural, como en las lagunas o estanques. El agua potable, por ejemplo, normalmente requiere una turbidez de 10 ppm.

## 53. ¿Cómo se determina un tratamiento de agua?

RESPUESTA: Esto requiere personal especialista entrenado en tratamiento de aguas, especialmente cuando la calidad del agua para proceso o generación termoeléctrica necesita unos niveles restringidos de concentración, acidez (pH), nivel de oxígeno y criterios químicos semejantes que se desarrollan con tecnologías avanzadas. Los especialistas de tratamiento de agua comienzan con un análisis del agua, determinando los métodos para obtener los resultados deseados, estableciendo pruebas de control para ver si el tratamiento es efectivo para obtener la calidad apetecida del agua, hacer ajustes en el tratamiento cuando las pruebas determinan que se necesitan o si hay cambio de condiciones del suministro de agua o como resultado de los problemas del proceso. Con relación al tratamiento de agua de caldera, una inspección interna es parte vital de la comprobación de la efectividad del tratamiento de agua.

## 54. ¿Cómo está siendo aplicada la tecnología de membranas al tratamiento de agua de calderas?

RESPUESTA: La tecnología de las membranas está siendo aplicada como una técnica auxiliar al intercambio iónico. Esto permite mayores tiempos de operación. El tratamiento por membranas consiste en pasar el agua a presión con impurezas a través de una película muy



**Figura 12.22.** Una membrana de composite arrollada en espiral, de flujo paralelo, tiene una salida por el tubo central del permeado (agua tratada). Esta disposición se denomina de flujo cruzado, ya que el agua tratada pasa al tubo central en ángulo recto (perpendicular) al flujo o caudal efluente. (Cortesía de *Power magazine*.)

finas de composite o compuestos tales como el acetato de celulosa. Cuando la corriente influente (o afluyente) pasa a través de estos medios filtrantes, deja la materia particular detrás, ya que el agua más pura pasa a su través. Para las plantas con desmineralizadores de intercambio iónico, la adición de unidades de membranas aguas arriba se considera una economía de coste para el proceso de agua de alimentación con sólidos disueltos por debajo de 300 ppm. (Véase la Figura 12.22.)

**55.** ¿Qué es ósmosis inversa?

RESPUESTA: El término se aplica a menudo al proceso de membranas para desmineralizar el agua. El fenómeno físico de la ósmosis revela que el agua pura se separa de una solución con impurezas con una separación semejante a la de una membrana sin presión aplicada, así que el agua pura fluirá con un flujo lento a través de la separación (membrana) hacia la solución concentrada que contiene las impurezas.

En la *ósmosis inversa* la presión se aplica sobre el lado de la solución con impurezas, de modo que el flujo de agua pura hacia la membrana se invierte, de aquí el término ósmosis inversa.

