

Capítulo 4

CALDERAS ELÉCTRICAS Y DE APLICACIONES ESPECIALES

CALDERAS ELÉCTRICAS

Hay dos tipos básicos de calderas eléctricas disponibles. Primero, unidades de baja capacidad y tensión, consistentes básicamente en resistencias eléctricas. En el tipo de resistencias, la corriente eléctrica genera calor al pasar a través de una resistencia o elementos de resistencias. Éstas constan de unos hilos encapsulados y con una cubierta metálica aislada eléctricamente y están sumergidas en el agua para generar vapor a presión moderada, con capacidad de producción baja. Estos tipos de unidades no dependen de la conductividad o resistencia del agua para generar calor. Además, en calderas de electrodos, la corriente fluye a través del agua, como se muestra en las Figuras 4.1a, b y c de la página siguiente, y no a través de hilos. El líquido de la caldera convierte la energía eléctrica en térmica.

La crisis energética y las regulaciones de contaminación del aire han creado una demanda de calderas eléctricas de producción elevada, por encima de los 4.500 kg/hr de producción. Allí donde la energía eléctrica es barata, las unidades de alta tensión están disponibles, y ahora con capacidades en aumento. Una unidad de alta tensión se clasifica como caldera con una de energía eléctrica entre 2.300 y 15.000 voltios (V). La caldera de vapor de electrodo de alta tensión mostrada en la Figura 4.1a tiene tres compartimentos de generación, uno para cada fase o electrodo. El vapor se genera a medida que la corriente eléctrica va de los electrodos a las paredes del neutro de los compartimentos cilíndricos que los contienen.

Las calderas de alta tensión de electrodos separados, como se ve en las Figuras 4.1b y c, controlan la producción regulando la cantidad de agua pulverizada sobre los electrodos que están suspendidos e inmersos en el espacio de vapor. El camino de la corriente se crea a medida que el agua fluye a través de los pasos de un compartimento de almacenaje hacia los electrodos. El agua que no se convierte en vapor escurre por los electrodos y cae a un contraelectrodo. Esto crea un segundo camino de la corriente para producción de vapor: desde los electrodos al contraelectrodo. El agua restante retorna al depósito.

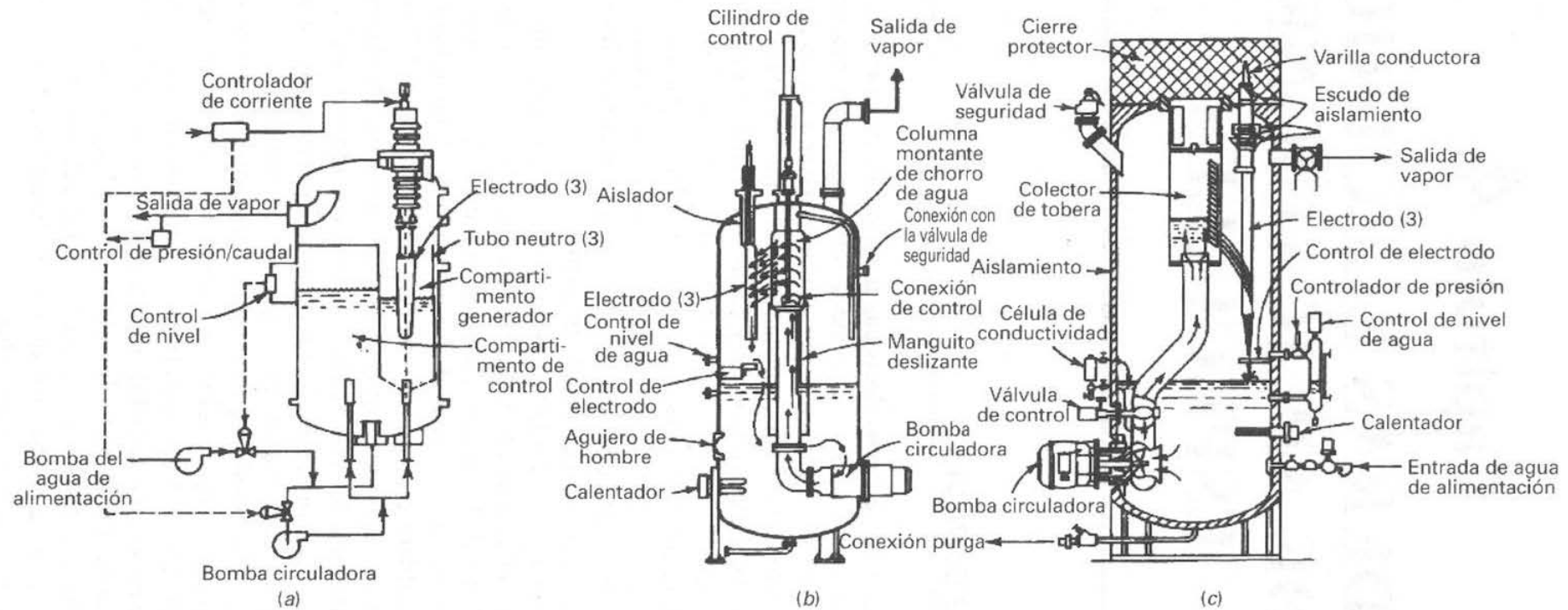


Figura 4.1. Tipos de calderas de electrodo. (a) La corriente fluye a través del fluido hasta la pared del compartimento generador. (b) Caldera de alta tensión con electrodo rociado con manguito deslizante de control para regular el caudal de agua. (c) Caldera de alta tensión con electrodo rociado y con caudal de agua regulado por un distribuidor rotativo.

Las calderas de electrodos son compactas y vienen completamente equipadas con controles y dispositivos de seguridad. La mayoría de las calderas tiene controladores para mantener la conductividad dentro de los límites del fabricante, monitorizando el agua y añadiendo productos químicos a medida que se necesitan, así como purgando la caldera cuando es necesario. Con la caldera de electrodos es necesario controlar la conductividad dentro de rangos específicos según las prescripciones del fabricante. Si la conductividad es demasiado baja, puede no alcanzarse la producción de la caldera; si es demasiado alta, puede ocurrir un cortocircuito. El tratamiento del agua es también importante con estas calderas, porque un tratamiento defectuoso puede afectar a la conductividad así como crear problemas en el vapor, como el espumado.

La mayoría de los estados incluye a las calderas eléctricas en sus reglamentaciones. El código ASME constata que las calderas eléctricas de un diseño que emplee cubierta removible, que permita un fácil acceso para inspección y limpieza de la virola, y que tengan un contenido normal de agua que no exceda de 100 galones (378,54 l), no necesitan estar provistas de aberturas de inspección ni desagües.

El acceso usual para inspección y limpieza es la conexión de la cubierta del electrodo con el interior de la caldera. Debe desplazarse para comprobar las condiciones internas de la caldera. Al mismo tiempo comprobar las condiciones de los elementos eléctricos.

La capacidad de una válvula de seguridad viene determinada por la potencia. La capacidad mínima de la válvula de seguridad debe ser, al menos, de 1,59 kg/(hr/kW). Esto es cierto siempre que se trate de una caldera de alta o baja presión. En base a 0,25 kcal/hr, el requisito es de 882 kcal/hr por cada kilovatio de entrada de energía.

Aunque se requieren controles de bajo nivel de agua para las calderas eléctricas de resistencias, éstos no son necesarios para calderas del tipo de electrodos. La razón es que aquéllas no pueden generar vapor cuando el nivel de agua es bajo o cuando no se precisa vapor. Para asegurar que la caldera tiene la salinidad adecuada, se suministra generalmente un control de conductividad. Esto significa que se añaden sales a la unidad o se purga, dependiendo de las condiciones del agua. Todas las calderas eléctricas deberían estar construidas de acuerdo con el código ASME de calderas y también aprobadas por laboratorios aseguradores certificados.

CALDERAS DE AGUA DE ALTA TEMPERATURA

Un sistema de agua caliente de alta temperatura (HTHW), mostrado en la Figura 4.2 de la página siguiente, es una caldera térmica que utiliza agua a elevada temperatura, normalmente a más de 300 °F (149 °C) y sin un límite específico de presión. Sin embargo, el código de presión para virolas de calderas ASME, Sección I, define una HTHW como la que usa agua a una temperatura por encima de 250 °F (149 °C) y a una presión por encima de 160 psi (11,2 kg/cm²). Los sistemas HTHW normalmente no están diseñados para temperaturas que sobrepasen los 260 °C. Las temperaturas de trabajo dentro del rango de 177 °C a 232 °C son las que se encuentran más frecuentemente. Por encima de 260 °C se utilizan otros fluidos térmicos para obtener temperaturas elevadas, como el *Downtherm* y fluidos inorgánicos similares.

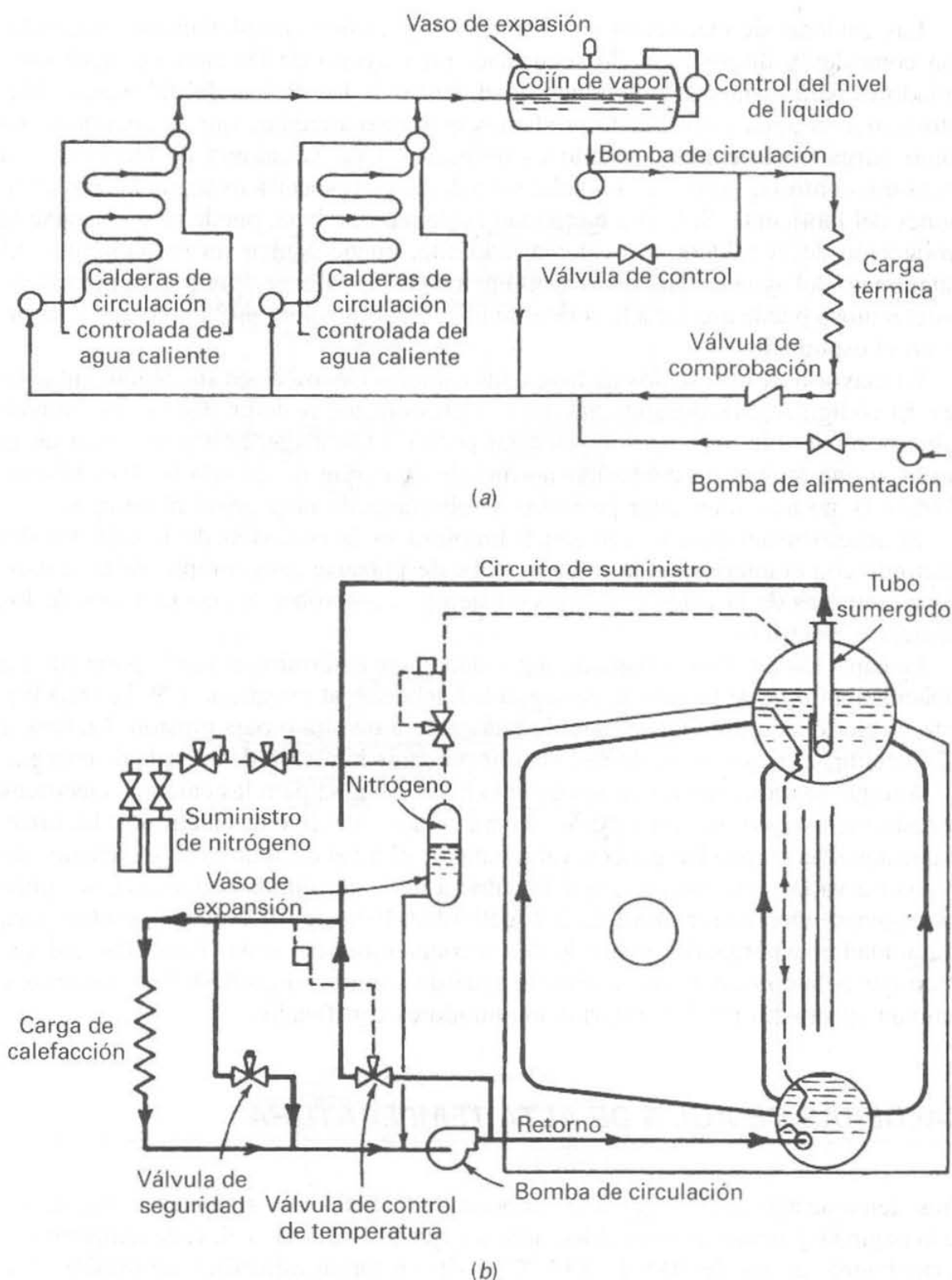


Figura 4.2. Las calderas de agua caliente de alta temperatura usan: (a) vaso de expansión; (b) calderín de caldera para permitir la dilatación y contracción del agua con los cambios de temperatura.

A estas temperaturas, el agua en su estado líquido puede existir sólo a presiones por encima de las correspondientes de saturación. Los sistemas de alta temperatura

tienen un amplio campo de utilización para suministrar las necesidades de calefacción de grandes aeropuertos, bases militares, edificios de oficinas, hospitales, universidades y otros grandes complejos de edificios. La aplicación de los sistemas HTHW se ha extendido a muchos procesos industriales en los campos de la química, plásticos, goma, galvanotecnia, papel, textiles, etc.

Ventajas de los sistemas de agua a alta temperatura (HTHW). Para muchas aplicaciones, los sistemas de agua a alta temperatura tienen distintas ventajas sobre los sistemas de vapor. Las principales ventajas son:

1. A causa de su gran capacidad de almacenaje térmico, un sistema HTHW permite un control muy estrecho de la temperatura, lo cual es importante en muchas aplicaciones de procesos.
2. La gran cantidad de calor del sistema constituye una reserva térmica de modo que las variaciones de carga tienen un mínimo efecto sobre la caldera, permitiendo el uso de una caldera de menor capacidad unitaria.
3. La ausencia de corrosión en la línea de retorno en un sistema HTHW, que es otro problema frecuente en un sistema de vapor, es otra ventaja.
4. No se necesitan purgadores, bombas de condensado, depósitos, venteos ni otros equipos de retorno de condensado, originándose así un coste primario menor, menor mantenimiento y ausencia de pérdidas de vapor.
5. Se necesita una pequeña cantidad de agua de reposición, así que no hay necesidad de un sistema caro de tratamiento de agua.

Desventajas de los sistemas de agua de alta temperatura (HTHW). Hay varias desventajas; una de las más importantes es el gran volumen de agua del sistema. Esto produce los siguientes inconvenientes:

1. El sistema toma más tiempo para calentarse en el arranque.
2. Se necesita más tiempo para enfriarse cuando se ha de hacer una reparación o alteración y hay que descargar mucha agua.
3. Si se rompe una tubería o recipiente a presión, el contenido de agua, al estar por encima del punto de ebullición atmosférico, se convertirá parcialmente en vapor de forma instantánea con un poderoso efecto disruptor. Incluso una fuga relativamente pequeña puede producir un daño considerable por el agua antes de que el sistema pueda ser despresurizado.

Ambos tipos de caldera, de tubos de humos y de tubos de agua, se usan para estos sistemas. La principal ventaja de las calderas pirotubulares para esta aplicación es que normalmente son más baratas en los tamaños por debajo de 600 HP. Por encima de este tamaño, se utilizan las de tubos de agua. Sorprendentemente, la caldera de cajas o cabezales se utiliza principalmente para las menores capacidades; sin embargo, la unidad de circulación forzada (tipo *LaMont*) se usa mucho.

Los generadores de agua caliente de tubos de agua están disponibles en tamaños compactos hasta los 37,8 millones de kcal/hr, y para temperaturas de agua hasta los 343 °C. El equipo de combustión utilizado es el mismo que el utilizado para las calderas de vapor. Pueden usarse todos los tipos de combustibles.

Presurización y control de caudal. Hay tres consideraciones en el diseño de un sistema HTHW, que no son fundamentales en el diseño de sistemas de vapor; son:

1. Cómo mantener la presión de agua en circulación por encima de la presión de saturación para la temperatura requerida de agua.
2. Cómo proceder para absorber la expansión del sistema de calefacción y generador de agua.
3. Cómo asegurar tasas de caudal uniformes bajo todas las condiciones de operación.

Hay tres métodos de presurización utilizados —colchón de vapor, gas y mecánicos— y dos métodos de acomodar la expansión del agua —en un acumulador separado o en el calderín superior de la caldera para unidades del tipo de calderín que sirven a los sistemas pequeños de calefacción.

La disposición del cojín de vapor se utiliza normalmente para capacidades grandes y sistemas de agua caliente de funcionamiento continuo, como los que se utilizan en muchos aeropuertos, porque mantiene un control estricto de la temperatura del agua, más que los otros dos. Véanse las Figuras 4.2a y b.

El agua caliente a alta temperatura de la caldera descarga en un vaso de expansión separado, donde una pequeña cantidad del fluido se vaporiza instantáneamente para mantener la presión del sistema. La tasa de combustión de la caldera está controlada por la presión del calderín. El calderín está situado muy por encima de la caldera para permitir el libre desprendimiento de vapor y asegurar una altura razonable o presión en aspiración de la bomba de circulación. Es necesario evitar la introducción de grandes cantidades de agua fría de retorno en el calderín para evitar el colapso del cojín. Tal condición provoca vaporización instantánea y ariete o golpe hidráulico en el sistema de tuberías.

En el *sistema de presurización por gas inerte*, un colchón de nitrógeno se mantiene en un recipiente de expansión que está parcialmente lleno con agua del sistema de circulación. La presión del nitrógeno se mantiene por encima de la de saturación del líquido.

Las calderas de agua caliente de alta temperatura deberían tener un corte de combustible por bajo nivel de agua en el caso de que el nivel de agua caiga por debajo de un nivel seguro. En las unidades de circulación forzada, es deseable un dispositivo de presión diferencial o control de caudal, de modo que el combustible para el quemador se corte en el caso de que no haya circulación de agua. Las calderas de agua caliente de alta temperatura pueden no necesitar un nivel de agua de vidrio o grifos de prueba si la caldera está llena de agua y tienen un vaso de expansión exterior. Sin embargo, si la caldera es de circulación natural con calderín, entonces el código exige un nivel de vidrio y grifos de prueba, porque el calderín puede tener variaciones de nivel de agua que pueden ser puestas de manifiesto al operador que comprueba si son correctas. La Figura 4.2b muestra una caldera de tipo D, de circulación natural, en la que el calderín actúa como vaso de expansión. Esta caldera (sin calderín) necesitará un nivel de vidrio por reglamentación.

Transferencia de calor a alta temperatura mediante fluidos orgánicos líquidos y vapores. Los fluidos térmicos como aceites, silicatos, glicoles y líquidos similares con elevados puntos de ebullición se utilizan allí donde se demandan temperaturas

elevadas por necesidades del proceso pero a bajas presiones de trabajo. Estas necesidades incluyen secado de yeso, algodón, pintura y otros productos fabricados que previamente pueden haber sido conseguidos por calentamiento directo con gas natural. Las temperaturas de hasta 750 °F (400 °C) son prácticas con fluidos térmicos; un límite de 538 °C no queda demasiado alejado.

Donde pueden usarse sistemas HTHW, son preferidos a los líquidos térmicos, porque tienen cerca del doble de capacidad térmica, no se deterioran con el uso y son baratos.

Los sistemas de líquidos térmicos también son utilizados junto con sistemas de vapor. Las plantas que requieren vapor a alta presión para aplicaciones específicas y que pueden aplicar líquidos térmicos para otros usos también pueden instalar un intercambiador térmico líquido-vapor y usar parte de su producción para generar vapor. Esto elimina la instalación de una caldera separada calentada por gas o aceites de petróleo (gas-oil, fuel-oil, etc).

Cuando una sustancia orgánica está en estado líquido, la unidad calefactora se denomina de calentador, y si está vaporizada se llama vaporizador. El calentamiento puede llevarse a cabo en unidades calentadas eléctricamente hasta aproximadamente 250.000 kcal/hr, y para unidades por encima de esa cifra normalmente se calientan por gas, combustibles líquidos e incluso carbón. Las unidades calefactoras son generalmente compactas y de marcha automática hasta una capacidad máxima de 75 millones de kcal/hr. Como norma, para capacidades mayores se utilizan unidades múltiples.

Los sistemas utilizados pueden clasificarse como sigue:

1. Los sistemas de vapor son normalmente del tipo pirotubular usando retorno por gravedad o de condensado bombeado. Véase la Figura 4.3b de la página siguiente.
2. Los sistemas líquidos usan calderas de tubos de agua, bien con circulación natural o forzada, como se muestra en la Figura 4.3a. La Figura 4.4a de la página 139 muestra una caldera horizontal del tipo de tubos de agua helicoidales. El diseño, una vez más, de circulación forzada, se usa para las capacidades mayores.

Entre los fluidos orgánicos utilizados están: *Downtherm*, *Aroclor*, *Therminol*, *FR* y *Tetralin*, así como *Diphil*, de la casa Bayer®. Cada una de estas sustancias tiene propiedades similares, pero los detalles concretos deberán obtenerse de los fabricantes. Como muchos de ellos son hidrocarburos, un fallo o rotura de tubo puede crear peligro de incendio en la unidad. Algunos departamentos de las compañías de seguros de incendios requieren instalar un dispositivo antiincendio de vapor o gas inerte en la unidad para comprobar un posible incendio ante una fuga o pérdida de presión. Los controles de seguridad incluirán un dispositivo de corte por temperatura elevada, por presión elevada y un conjunto de válvulas de seguridad para presión máxima permisible en la unidad.

El *Dowtherm* es uno de los fluidos orgánicos más conocidos, y una revisión de algunas de sus características es como una revisión de las de otros fluidos orgánicos. En la Figura 4.4d, se notará que a una temperatura de 343 °C se produce una presión de *Dowtherm* de alrededor de 3,7 kg/cm². Para alcanzar esta temperatura con vapor saturado se necesitará una presión de 154 kg/cm². Los costos comparativos de fabricación de calderas para estas presiones son obvios.

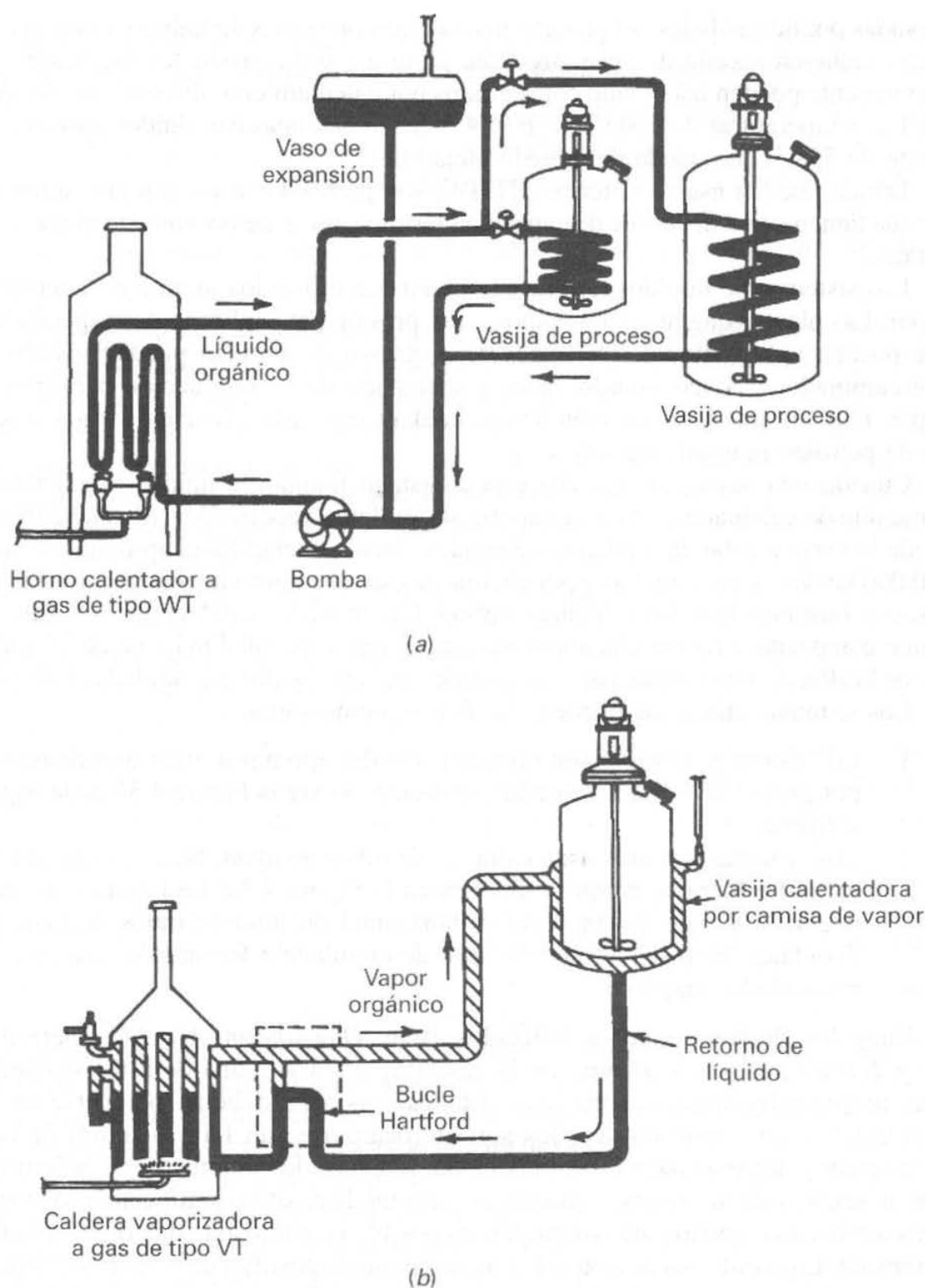
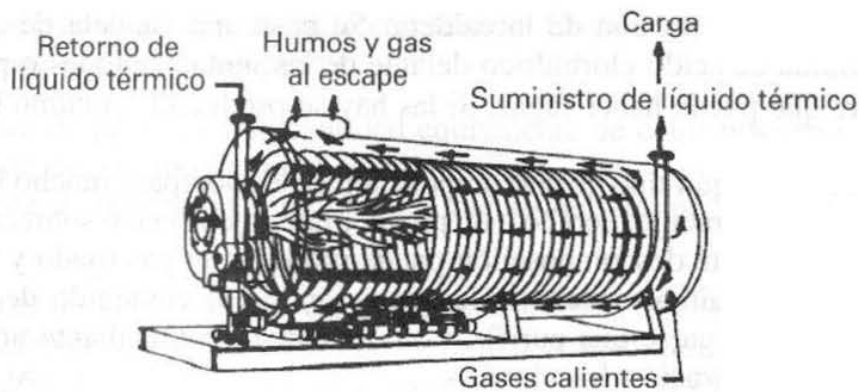


Figura 4.3. Calderas orgánicas. (a) Calentador de líquido con circulación forzada. (b) Caldera de vapor con retorno de condensado por gravedad. (Cortesía de Dow Chemical Co.)

El *Dowtherm* es una materia orgánica. El *Dowtherm A*, que hierve a 260°C y está recomendado para temperaturas de hasta 400°C , está compuesto por un 26,5 por 100



(a)

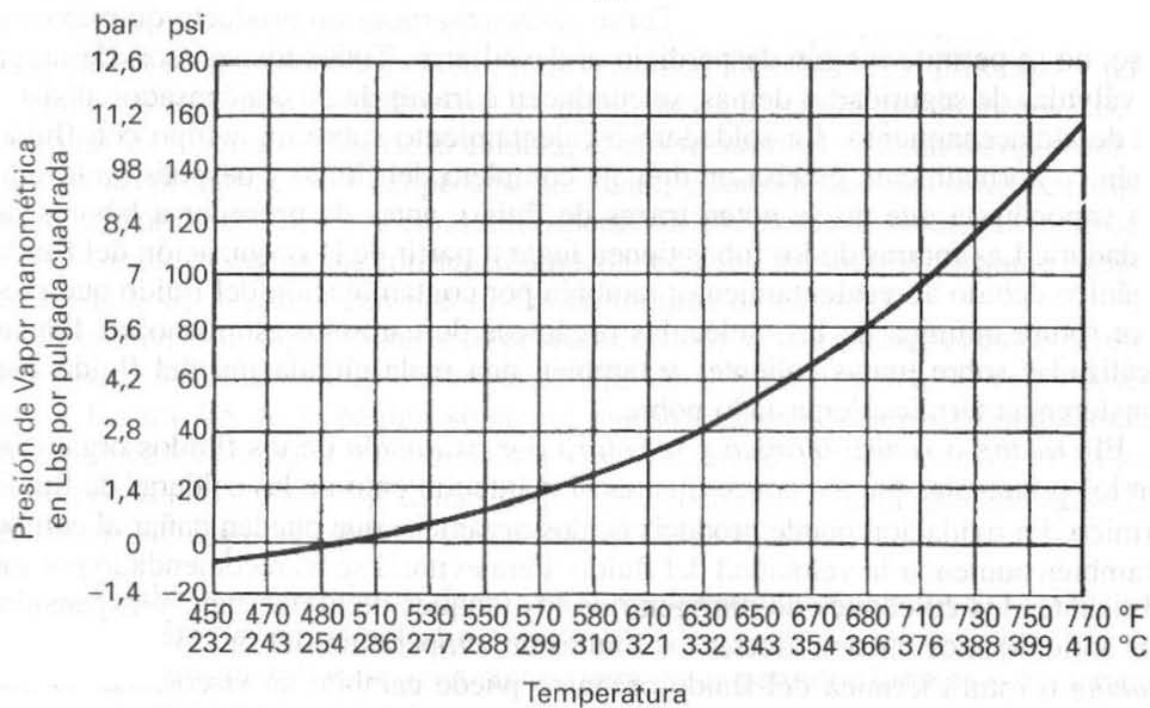


Figura 4.4. (a) La caldera de tipo serpentín calienta líquido orgánico hasta 5 millones de kcal/hora. (Cortesía de Power Magazine.) (b) Curva de presión-temperatura del vapor de Dowtherm A. (Cortesía de Dow Chemical Co.)

de difenilo y un 73,5 por 100 de óxido de difenilo. El Dowtherm C se usa sólo en fase líquida y para temperaturas hasta 427 °C. El Dowtherm no es tóxico.

Es más difícil mantener la estanqueidad de las juntas con Dowtherm que con vapor o agua, y así las juntas o uniones más adecuadas de las calderas son soldadas en vez de roblonadas y los tubos van soldados a los calderines. Mientras una prueba hidrostática bajo presión de agua fría puede descubrir fugas en defectos de una caldera de vapor, no habría indicación de pérdida o fuga más que con Dowtherm caliente. La prueba más satisfactoria para las calderas de fluido térmico Dowtherm es introducir amoníaco gas (NH_3) en el sistema a una presión de hasta 0,07 kg/cm² o llenar la caldera al 50 por 100 con agua amoniacal. Se aplica después aire a presión,

al 50 por 100 de la presión de la caldera. Se pasa una candela de azufre o una solución diluida de ácido clorhídrico delante de las juntas, uniones o puntos donde se considere que pueda haber fugas. Si las hay se producirá un humo blanco como resultado indicador.

Puede ocurrir algún tipo de descomposición si se sobrepasa mucho la temperatura recomendada de trabajo, debido a un procedimiento erróneo o sobrecalentamiento localizado. Semejante descomposición puede producir un gas fijado y trifenilos solubles que pueden airearse durante la operación. Si el contenido de trifenilos es excesivo, debe efectuarse una purificación del *Dowtherm* mediante un método por destilación o cristalización fraccionada.

En las calderas de *Dowtherm* se proveen conexiones de purga; pero se usan sólo cuando la caldera está fuera de línea y fría, para el vaciado de la caldera o para arrastrar líquido para purificación. Como el *Dowtherm* es un producto químico valioso, no se permite ningún desperdicio ni despilfarro. Todos los venteos, descarga de válvulas de seguridad y demás, se conducen a través de un condensador al sistema de almacenamiento. La soldadura o calentamiento sobre un equipo con fluido orgánico normalmente precisa un drenaje completo del fluido y después un lavado con vapor hasta que no se noten trazas de fluido, antes de proceder a labores de soldadura. Las roturas de los tubos tienen lugar a partir de la coquización del fluido orgánico debido al recalentamiento; también por contaminación del fluido que produce rotura química de las moléculas orgánicas de carbono; asimismo las llamas localizadas sobre juntas calientes y también una mala circulación del fluido con transferencia térmica demasiado pobre.

El *cracking* o *rotura térmica* y la *rotura por oxidación* de los fluidos orgánicos son los principales puntos concernientes al mantenimiento de las calderas de fluido térmico. La oxidación puede producir ácidos orgánicos que pueden dañar al equipo y también aumentar la velocidad del fluido. Para evitarla se ha recomendado por los fabricantes los colchones de nitrógeno de los tanques de almacenaje y expansión. Los antioxidantes pueden afectar los límites de temperatura del fluido orgánico. El *cracking* o rotura térmica del fluido orgánico puede cambiar su viscosidad, lo que puede afectar a las bombas produciendo cavitación. Los depósitos de coque del *cracking* térmico pueden conducir a un sobrecalentamiento de los tubos. Algunos fluidos con base de petróleo han manifestado evitar la deposición de coque por formación de gránulos de carbono cristalino que no pueden adherirse a las superficies calientes. Los operadores deberían consultar con los suministradores de fluidos orgánicos sobre el tipo y fabricantes de tales productos si el fluido orgánico tiene que trabajar por encima de 700 °F (370 °C).

SISTEMAS DE CALOR PERDIDO, CICLO COMBINADO Y COGENERACIÓN

Calderas de calores perdidos. Hay numerosos procesos de fabricación que desprenden cantidades considerables de gases a temperaturas elevadas. Los más prominentes entre éstos son los gases de escape de turbinas como las que se usan en

plantas generadoras eléctricas de ciclo combinado. El valor de la recuperación térmica depende de tres consideraciones:

1. El coste de producir una cantidad equivalente de calor por otros medios.
2. El coste del equipo de recuperación.
3. El coste de operación y de mantenimiento del equipo de recuperación de calor.

Las calderas de vapor pueden diseñarse para utilizar el calor perdido como el total o parte del medio generador de vapor. Como la temperatura de los gases es normalmente de 260 °C a 590 °C, mientras los productos de combustión en la instalación calentada convencionalmente pueden entrar en los pasos generadores a 1.093 °C, deben utilizarse algunos medios de compensación. De otro modo, para tener una capacidad generadora de vapor apreciable, la caldera debería estar más allá de todo lo razonable en tamaño. Otros factores a considerar además de las presiones y temperaturas de los gases perdidos son las propiedades físicas y químicas del gas, su efecto en las diversas zonas de la caldera, el efecto sobre el sistema recuperador de calor de las perturbaciones del proceso de planta y consideraciones similares implicando la continuidad del servicio. La recuperación de calores de escape de los procesos industriales y equipo de combustión puede reducir a menudo el consumo total de combustible de la planta con una inversión mínima de capital.

La combustión suplementaria (o poscombustión) se usa cuando el calor perdido de los gases no tiene suficiente energía para producir la presión final de vapor deseada. La Figura 4.5 de la página siguiente muestra algunos calores o temperaturas típicas de gases perdidos y temperaturas normalmente disponibles de los procesos.

Dependiendo de las propiedades de los gases perdidos y de la presión/capacidad necesitada, se usan las siguientes calderas de recuperación:

1. Calderas pirotubulares, de ambos tipos, horizontales y verticales, si los gases están relativamente limpios.
2. Calderas de tubos de agua rectos, para gases perdidos limpios o moderadamente cargados de polvo.
3. Calderas de tubos de agua curvados (*Stirling*), para cargas muy polvorientas.
4. Calderas de circulación positiva, para gases limpios de baja temperatura.
5. Calderas presurizadas o supercargadas, para gases de escape de turbina (caldera tipo «Velox»). Utilizadas principalmente en Europa.

Como los gases perdidos muy a menudo tienen gases inertes y partículas sólidas atrapadas en la mezcla, deben considerarse materiales especiales y otros factores de diseño en la aplicación de una caldera de calor perdido. Estos factores de prácticas de operación de mantenimiento evitarán el tipo de rotura inesperado que puede ocurrir también en estas unidades. Entre los fallos y roturas posibles están los siguientes:

1. Roturas de tubos por acumulación de lodos y óxido, erosión de los tubos por los partículas de los gases y corrosión del material del tubo por el ataque químico del lado de los gases.
2. Masa de gases con contenido térmico elevado, produciendo el equivalente de un daño por sobrecalentamiento.

Tipo de gas	Temperatura, °F	Temperatura, °C
Proceso de oxidación de amoníaco	1.350-1.475	732- 802
Horno de recocido	1.100-2.000	593-1.093
Horno de cemento (vía seca)	1.150-1.500	621- 816
Horno de cemento (vía húmeda)	800-1.100	426- 593
Horno de reverbero de cobre	2.000-2.500	1.093-1.370
Escape de motor diesel	1.000-1.200	538- 649
Hornos de forja y caldeo de palanquilla	1.700-2.200	926-1.204
Escape de turbina de gas	850-1.100	454- 593
Incinerador de basuras	1.550-2.000	843-1.093
Horno abierto de fusión de acero soplado con aire	1.000-1.300	538- 704
Horno abierto de fusión de acero soplado con oxígeno	1.300-2.100	704-1.150
Horno básico de oxígeno	3.000-3.500	1.650-1.930
Horno de refinería petrolífera	1.000-1.100	538- 593
Proceso mineral sulfuroso	1.600-1.900	871-1.038
Horno de zinc	1.800-2.000	982-1.903

Figura 4.5. Gases de escape de procesos con temperaturas de salida disponibles de procesos industriales para generación de vapor.

3. Cegado de los pasos de gases por el lado de fuego, dando lugar a un sobrecalentamiento.
4. Mal funcionamiento de controles o equipos, produciendo unas condiciones de bajo nivel de agua, con daños en tubos y otros.

Un factor o condición a menudo despreciada en las calderas de vapor de calor perdido es la posibilidad de desarrollar una situación peligrosa de bajo nivel de agua (o de falta de agua) que, si no es detectada, puede producir fusión o quemado de los tubos en los casos de convección. Ésta es una consideración de diseño extremadamente importante. Es también una comprobación de trabajo muy importante que debería hacerse periódicamente para asegurar que la unidad está en condiciones de trabajo. Esta prueba debería ser la misma que cuando el corte de combustible o extinción de llama se producen en una caldera estándar. Básicamente el diseño debería incluir un mecanismo, ya sea una compuerta pesada o algún otro mecanismo de cierre rápido. De este modo, en caso de bajo nivel de agua, los gases de escape pueden cortarse en la caldera y hacer un *bypass* por la chimenea. Así el proceso básico no será interrumpido y la caldera será salvada de un serio daño por sobrecalentamiento.

Un método habitual es un dispositivo que automáticamente desvía los gases tan pronto como baja el nivel de agua a un nivel peligroso predeterminado. El tiempo es extremadamente importante en una situación de bajo nivel de agua, de modo que la entrada de calor debe interrumpirse rápidamente.

Las *plantas de ciclo combinado y cogeneración* están a veces agrupadas conjuntamente, pero necesitan definición. En una *planta de ciclo combinado*, un *prime mover* (primer motor), tal como una turbina de gas, acciona un generador eléctrico y los gases de escape de la turbina son dirigidos a una caldera de recuperación de calor, llamada generador de vapor por calor de recuperación o HRSH (*Heat Recovery Steam*

System), que genera vapor, y este vapor se dirige al segundo motor, una turbina de vapor que también acciona o arrastra un generador eléctrico. Este sistema combina así el ciclo de Brayton (turbina de gas) con el ciclo de Rankine sobre la turbina de vapor. *Cogeneración* es la generación simultánea de energía eléctrica con un subproducto que es el calor de proceso, o vapor para utilización en el proceso.

La planta de energía eléctrica de ciclo combinado usando turbinas de gas ha mostrado un crecimiento notable desde la crisis energética de 1973, debido a que el sistema ha aumentado el rendimiento energético de la planta térmica, ahorrando así combustible y también a causa de las mejoras de materiales y diseño en las turbinas de gas, que permiten mayor temperatura de trabajo y con ello mejor rendimiento. Las centrales están usando la tecnología del ciclo combinado para renovar viejas plantas con el turbogenerador de gas suministrando el calor de escape para hacer vapor que se destina a accionar viejos turbogeneradores de vapor (turbos).

La *cogeneración* de energía eléctrica y vapor para proceso ha sido estimulada por la legislación del gobierno federal PURPA (*Public Utility Regulatory Policies Act*), con que anima y estimula a obtener el máximo de energía de los combustibles por razones de conservación y ahorro energético. Los productores eléctricos independientes han conseguido vender electricidad a las centrales locales por la legislación PURPA y vender vapor a las plantas industriales próximas, o producir vapor para utilización propia y vender el excedente eléctrico a la central o compañía eléctrica local.

La Figura 4.6 de la página siguiente es una planta de cogeneración de ciclo combinado. Las unidades clave son dos turbinas industriales de servicio pesado, cada una de 40,5 MW a 65 °F (18,3 °C) de temperatura ambiente; dos calderas de calores perdidos cada una de 64.400 kg/hr, 63 kg/cm² y 482 °C de temperatura del vapor; una sección de media presión a 4,2 kg/cm² produce un total de 22.680 kg/hr de vapor; y una sección a 0,7 kg/cm² produce vapor para el desaireador. El vapor a 63 kg/cm² se envía a un turbogenerador de vapor único tarado de 9,6 a 31,6 MW sin extracción de vapor 42 kg/cm². Los gases del escape de la turbina entran a una caldera de recuperación a 990 °F (532 °C) y salen de la chimenea a 276 °F (135,5 °C).

Un sistema de control distribuido regulará automáticamente todos los sistemas de la planta, excepto las turbinas de gas y vapor, que tienen sus propios controles. Sin embargo, el esquema de control integrado monitoriza el rendimiento de las turbinas para integrarlos en la red automática principal.

Las calderas del tipo de tubos de agua (véase la Figura 4.7 de la página 145) se usan en plantas de ciclo combinado, como se muestra en la Figura 4.6. Dependen de grandes superficies de transferencia térmica por convección, ya que no hay un hogar que suministre calor radiante. La combustión suplementaria o poscombustión se usa en las grandes plantas de cogeneración durante las demandas punta de vapor, con quemadores en vena o conducto colocados entre las turbinas de gas y las calderas.

Las calderas de recuperación de gases perdidos (HRSG) normalmente emplean un quemador de conducto para elevar la temperatura del escape de la turbina de gases, y así aumentar la producción de vapor, como se precisa durante los períodos punta de demanda de carga. Las consideraciones de diseño de la envolvente o *casing*s de la caldera limitan la temperatura máxima de los gases después del quemador de conducto a aproximadamente 927 °C, para evitar alabeos del material de cierre y recubrimiento que pudieran producir problemas de estanqueidad.

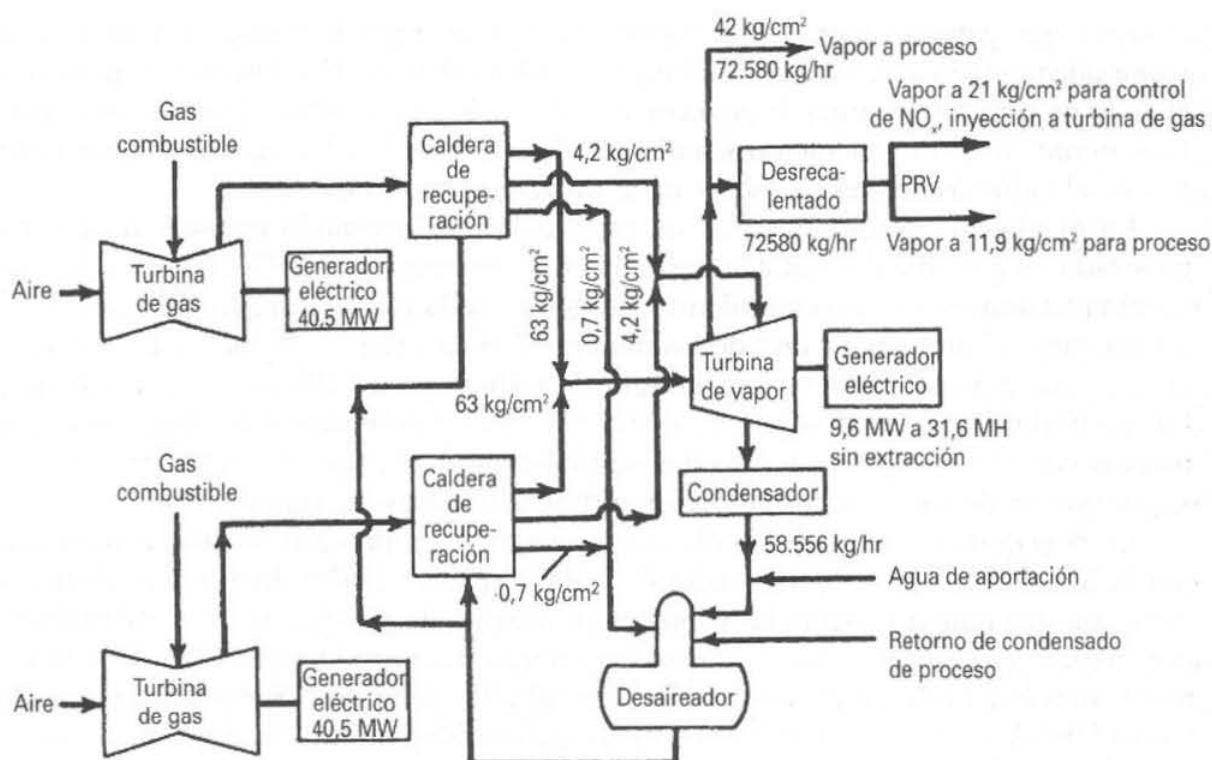


Figura 4.6. Planta de cogeneración en ciclo combinado con dos turbogeneradores de gas y dos calderas de recuperación de calores perdidos o HRGS*. La planta es capaz de generar hasta 112,6 MW de energía eléctrica y también suministra 45.360 kg/hr de vapor a 42 kg/cm².

Se utilizan los tubos de acero verticales y esto promueve la circulación natural a medida que se forman las burbujas de vapor y después suben hasta el calderín de vapor. También se utilizan tubos aleteados para suministrar unas superficies de transferencia térmica mayores en las calderas de recuperación (HRSG). Como se ve en la Figura 4.7, a medida que la planta de ciclo combinado ha crecido en tamaño, las calderas de recuperación de varias presiones se han ido desarrollando para suministrar vapor a las turbinas de vapor (primer motor de la cogeneración), pero también para cumplir los requerimientos de vapor de baja presión en la planta o para usos de proceso.

Las plantas de ciclo combinado deben cumplir con las normas jurisdiccionales de emisiones sobre descargas de CO y NO_x a la atmósfera. Se usan varios métodos, uno de los cuales es la inyección de vapor en la turbina de gas para bajar la temperatura de los gases. Este vapor también viene de la caldera de recuperación: se ha trabajado mucho sobre ello para mejorar el rendimiento de la planta de ciclo combinado. Una de las direcciones ha sido la conversión del carbón en gas bajo presión para quemarlo en la turbina de gas.

Otro tema es el *ciclo Cheng*. Este ciclo inyecta vapor en la turbina de gas después de que el vapor está sobrecalentado para incrementar el rendimiento eléctrico.

* N. del T.: En España a las calderas de recuperación de gases, que en EE.UU. se denominan abreviadamente como HRGS, las denominamos también en abreviatura CR. Es también otra abreviatura, en EE.UU., el término PRV (válvula reductora de presión o *pressure reducing valve*).

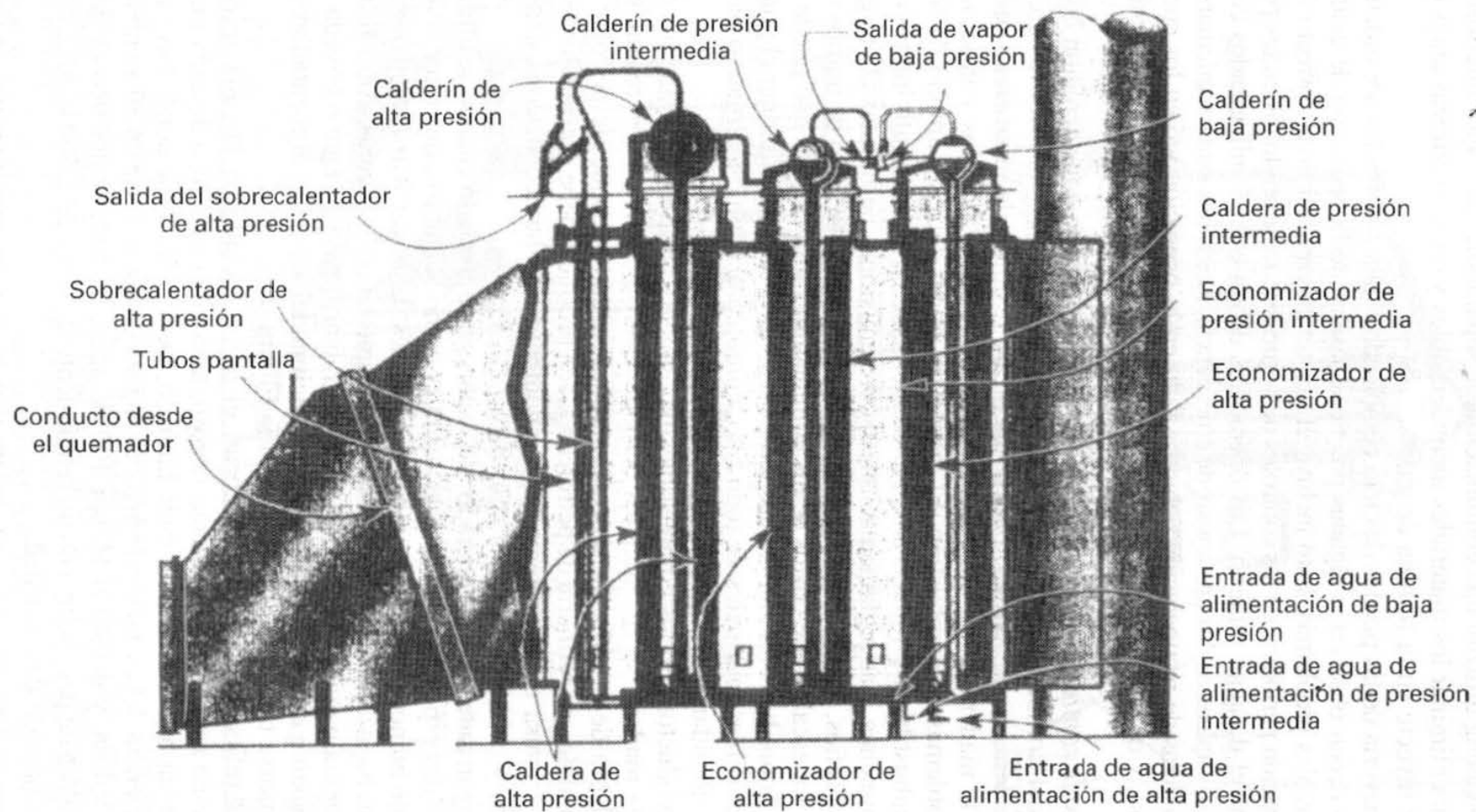


Figura 4.7. La caldera de recuperación de gases de escape en las plantas de ciclo combinado han aumentado en producción y generan vapor a varias presiones para el turbogenerador de la planta, para inyección de vapor en la turbina de gas y para otros usos o consumos de planta. (Cortesía de *Power magazine*.)

Esto requiere pureza del vapor en el rango de ppb (partes por billón). Las unidades del ciclo Cheng utilizan una combinación de separadores de vapor interiores y exteriores para eliminar los materiales incondensables y otras impurezas antes de que el vapor se inyecte en la turbina de gas.

La mayoría de las plantas de ciclo combinado están controladas por ordenador. Sin embargo deben observarse algunas prácticas básicas de la operación de calderas para evitar posibles problemas. Esto incluye el mantenimiento del nivel correcto de agua y comprobación periódica de los controles de seguridad, incluyendo los cortes por seguridad de nivel de agua mínimo. Los operadores deben estar familiarizados con las estrategias a emplear en circunstancias de emergencia. Los tubos pueden quemarse o fallar en las calderas de recuperación debido a fallo en la operación y/o en los controles de seguridad, y quizás a la confusión del operador cuando sobreviene el accidente.

Calderas de combustibles residuales. Deben tomarse en consideración las características del combustible cuando se utilizan muchos combustibles residuales tales como madera, serrín, virutas, papel, muebles y residuos de industrias similares que utilizan la madera como material básico. Los residuos líquidos y gaseosos tienen otros problemas de combustión. El diseño del hogar debe ser amplio de forma que estos combustibles residuales ardan eficientemente en él, sin emitir humos ofensivos por la chimenea. Las reglamentaciones sobre emisiones permitidas ahora gobiernan muchos diseños, incluyendo que la caldera sea del tipo de tubo de humos o de tubo de agua. La escalada de costos de los combustibles y la escasez que puede sobrevenir en el futuro han conducido a las industrias y gobiernos a examinar el potencial de los combustibles residuales de todo tipo, como combustible alternativo para un suministro abundante de combustibles, como los aceites y el gas.

Subproductos sólidos combustibles hay muchos. Entre ellos están los desperdicios de la madera, serrín, hollejos del café y nueces, maíz y sus residuos, bagazo (subproducto de la caña de azúcar), carbón vegetal y coque de petróleo (residuo sólido final de una refinería de petróleo). Cada producto debe ser tratado de un modo especial a causa de las diferencias de contenido de humedad, consistencia, peso específico y contenido o poder calorífico.

El hogar, antes que el generador de vapor, se ve afectado cuando se utilizan estos combustibles especiales. Los productos tales como el bagazo, que tiene cerca del 50 por 100 de humedad, requiere un hogar holandés. El hogar *Ward* es un diseño popular para el bagazo tanto en Estados Unidos como en otros lugares. Aquí el bagazo se seca y quema parcialmente en celdas de refractario bajo un arco o bóveda radiante. La combustión de los gases se completa encima del arco. Los alimentadores *Stocker* pueden usarse también como se ve en la Figura 4.8a.

En el refinado de la caña de azúcar, el jugo obtenido de la caña se procesa y convierte en azúcar. El remanente fibroso, tenaz y voluminoso de caña machacado se denomina bagazo. Está también húmedo. Dependiendo de dónde haya crecido y de la eficiencia del extractor de jugo, el bagazo contiene entre un 30 a un 50 por 100 de fibra leñosa, y del 40 al 60 por 100 de agua. El poder calorífico es de 4.490 a 4.850 kcal/kg de peso seco, con un rendimiento de cerca de 2.500 kcal/kg con 45 por 100 de contenido de humedad.

La Figura 4.8b muestra una caldera que quema una combinación de recortes de madera y combustible líquido petrolífero (gas-oil o fuel-oil).

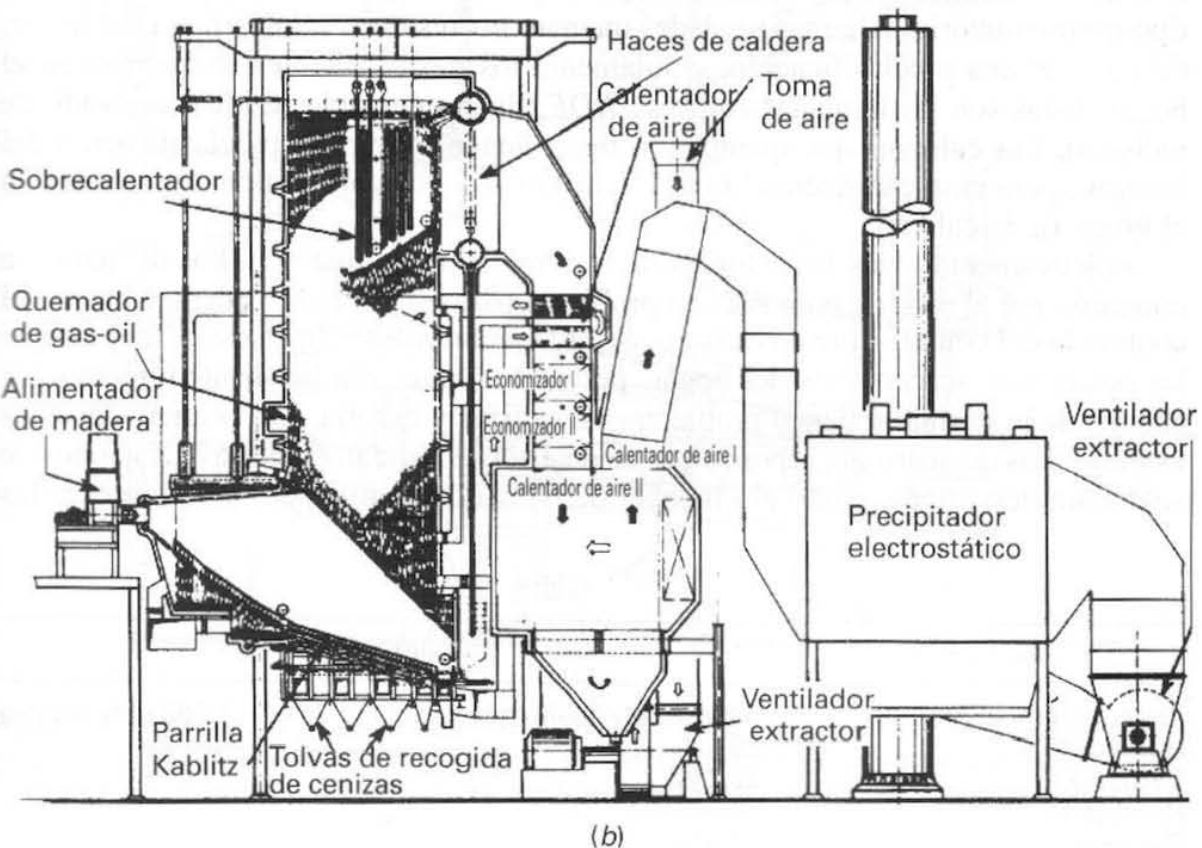
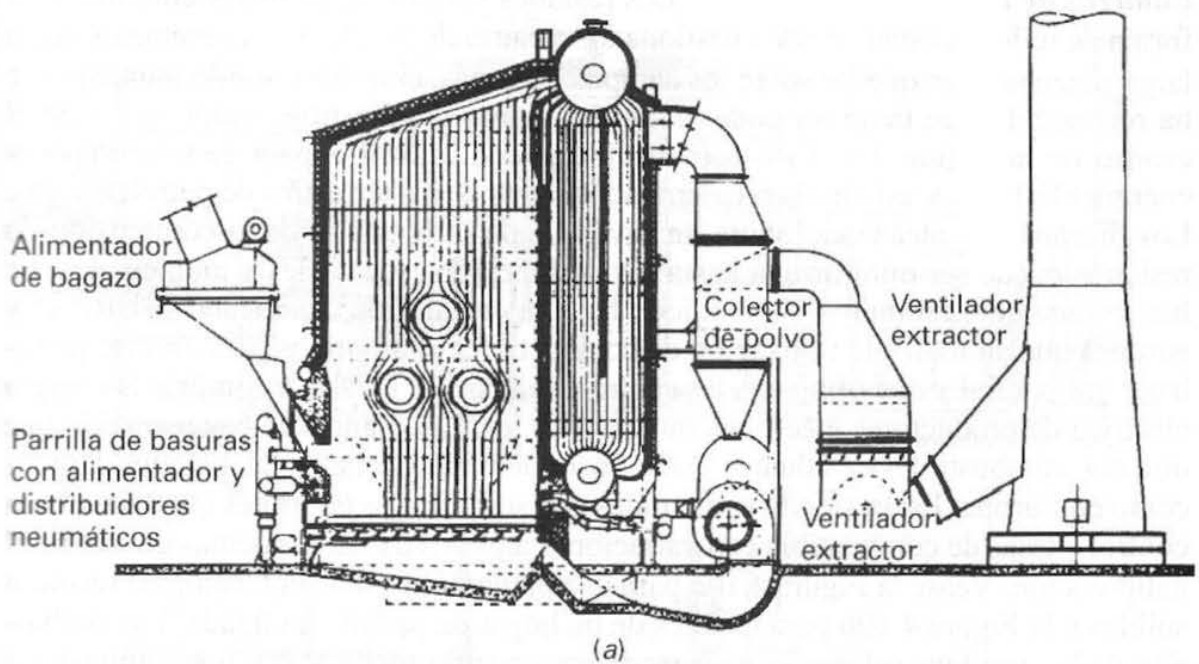


Figura 4.8. (a) Caldera de tubos de agua quemando bagazo con alimentador de basuras tipo «stoker» y quemadores auxiliares de combustible líquido; capacidad: 45.360 kg/hr, a 24,5 kg/cm². (Cortesía de Riley Corp.) (b) Caldera de combustible combinando madera y combustible líquido; genera 144.000 kg/hr de vapor con madera, y 215.900 kg/hora con combustible líquido a 65 kg/cm² y 460 °C. (Cortesía de Gotaverken Energy Systems Inc.)

Calderas de residuos energéticos. Los residuos sólidos municipales enterrados en forma de rellenos están siendo cuestionados a causa de los efectos ambientales que a largo plazo pueden quedar sobre los campos. Además, el residuo sólido municipal se ha reconocido que tiene un poder calorífico como combustible, como se ve en el cuadro de la Figura 4.9. Este combustible puede utilizarse para generar vapor y energía eléctrica, y así ahorrar los limitados suministros terrestres de petróleo y gas. Los diseños han alcanzado ahora un nivel donde la polución de la combustión de residuos puede ser minimizada hasta niveles aceptables estatales y municipales. Se han promovido estímulos económicos bajo la legislación americana (PURPA) y europea que animan a la utilización de combustibles alternativos para ahorrar petróleo y gas natural y que obligan a las centrales eléctricas locales a comprar la energía eléctrica de productores eléctricos independientes. Las plantas de cogeneración que utilizan combustibles residuales están incrementándose tanto en Estados Unidos como en Europa. Están siendo construidas con sofisticados controles que incorporan control y tasas de combustible con variaciones amplias de carga además de controles antipolución. Véase la Figura 4.10a para una planta típica de combustión de residuos sólidos y la Figura 4.10b para detalles de un hogar de parrilla inclinada. La combustión de los residuos sólidos se hace mediante parrillas inclinadas o por combustores tipo horno rotatorio. Algunas unidades queman los residuos sólidos fuera del hogar, después de una preclasificación, y solamente los gases calientes se queman en el hogar. Éstas son las llamadas *calderas RDF* (de combustible residual derivado de rechazo). Las calderas que queman en masa tienen muy poca preclasificación del rechazo, pero emplean quemadores de lanzamiento con combustión del rechazo en el hogar de la caldera.

Prácticamente todas las calderas de rechazos son del tipo de tubos de agua. La corrosión por el lado de humos es un problema para este tipo de caldera, a causa del contenido del combustible de rechazo. Se utilizan ladrillos refractarios para proteger las zonas más susceptibles del hogar, pero éstos requieren un mantenimiento por encima de lo normal y tienen problemas de cenizas y escoria. Los primeros diseños usaron tubos de acero al carbono, que se deterioran rápidamente. Las aleaciones de soldadura depositada, como el «Inconel 625», han sido utilizadas para proteger los

Propiedad	Valor medio
Poder calorífico superior	3.800 mín ÷ 5.200 máx BTU/lb $\equiv$ 2.111 ÷ 2.888 máx kcal/kg
Humedad	20 %
Carbono	25,2 %
Hidrógeno	3,5 %
Oxígeno	22,3 %
Azufre	0,1 %
Sólidos inertes	28,3 %
Densidad, en granel lb/yd ³ , kg/m ³	270 ÷ 875 lb/yd ³ $\equiv$ 518,43 kg/m ³

N. del T.: 1 yd³ = 0,7645549 m³.

Figura 4.9. Propiedades típicas de los residuos sólidos municipales. (Cortesía de *Power magazine*.)

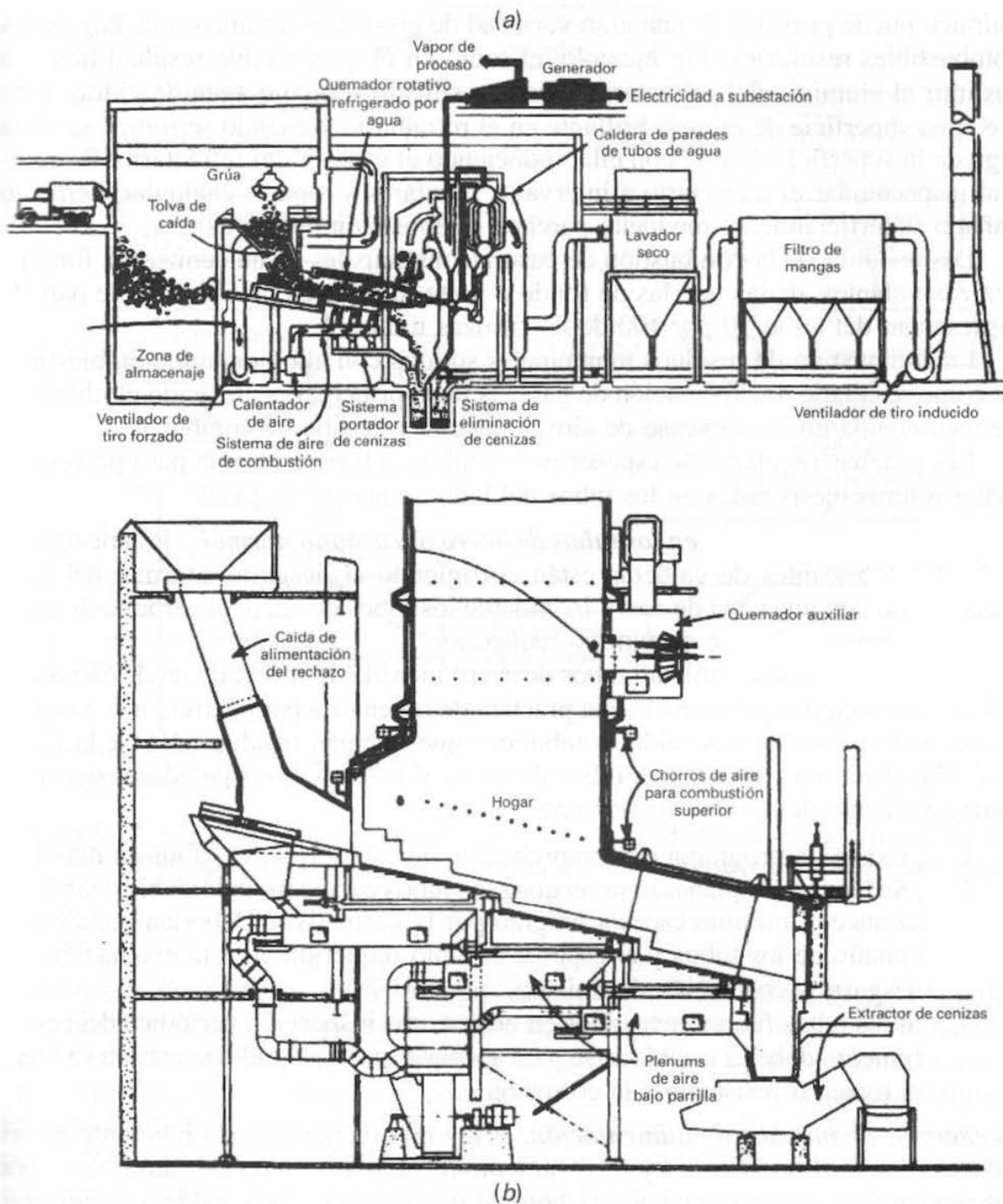


Figura 4.10. (a) Planta incineradora de residuos municipales con caldera de combustión en parrilla inclinada. (b) Detalles de un hogar y parrilla para quemar residuos municipales. (*Revista de Ingeniería Mecánica*, diciembre, 1988.)

tubos de acero al carbono, mientras el «Inconel 825» está siendo utilizado en las zonas de gases a temperatura elevada.

El mantenimiento del refractario está por encima de lo normal en calderas que queman residuos debido al gran desgaste o erosión de los tubos de acero al carbono, que también está influido por los ciclos de temperatura y por el ataque químico. Cada calentamiento desde el frío produce dilataciones entre el refractario y la chapa de alojamiento y esto puede producir choques térmicos en el refractario. El ataque

químico puede provenir de una gran variedad de productos químicos que hay en los combustibles residuales. Por ejemplo, el sodio en el combustible residual tiende a sustituir al aluminio del refractario y formar silicato sódico o agua de vidrio. Esto crea una superficie de escoria brillante en el refractario y cuando se rompe se lleva algo de la superficie de éste con ella, reduciendo el espesor del refractario. Es esencial inspeccionar el refractario a intervalos regulares y reparar cualquier elemento dañado superficialmente mediante parcheo o reposición de piezas.

Los residuos de la combustión de basuras municipales crean cenizas de fondo y cenizas volantes, de las que las de fondo o parte inferior en las calderas de parrilla representan del 80 al 90 por 100 de las cenizas totales.

La combustión de residuos municipales sólidos con alto contenido en plásticos da como resultado una formación de gases ácidos, principalmente ácido clorhídrico. Se recomienda un gran exceso de aire al quemar este tipo de combustible.

Las pruebas regulares de espesor de los tubos deben efectuarse para prevenir y evitar roturas inesperadas en los tubos del lado de ataque de gases.

Modificaciones a realizar en los tubos de acero al carbono normal. Prácticamente todos los fabricantes de calderas están corrigiendo el desgaste anormal del tubo recubriendo con una capa de acero inoxidable los tubos de acero al carbono después de que el espesor alcance el mínimo requerido.

Algunos fabricantes utilizan tubos de acero inoxidable revestido en diseño original, y esto es ciertamente una buena práctica de ingeniería para enfrentarse a condiciones ambientales en las calderas tubulares que queman residuos. Véase la Figura 3.24a. Para estas plantas con tubos de acero al carbono, los operadores deberían inmediatamente determinar lo siguiente:

1. ¿Existe un programa de comprobación de espesor de los tubos en marcha?
2. ¿Se han hecho planes para recubrir los tubos con acero inoxidable cuando se alcance el mínimo espesor exigido por la normativa? Deberían incluirse el tamaño de los tubos y el espesor mínimo requerido en esta evaluación del desgaste y corrección del mismo.
3. Si los tubos fueron revestidos en origen, una inspección periódica del revestimiento debería establecerse para asegurarse de que todavía está en su lugar el material resistente a la corrosión.

Recambios de bombas de alimentación. Hay una fuente térmica inherente en las calderas de parrilla y barrotes y revestimiento refractario que puede causar daño por sobrecalentamiento si solamente hay bombas de alimentación de caldera accionadas eléctricamente y la energía eléctrica se interrumpe.

La ASME recomienda como recambio o repuesto bombas de alimentación accionadas por vapor o inyectores para las calderas alimentadas por «stoker» o alimentadas por otros métodos, cuyos hogares contengan grandes cantidades de refractario o que puedan tener o acumular grandes cantidades de escorias en el asiento del hogar. La bomba accionada por vapor se requiere incluso si existe repuesto de bombas accionados eléctricamente, a no ser que exista en el lugar una fuente de alimentación eléctrica auxiliar completamente independiente. El propósito de estas prácticas recomendadas es evitar el recalentamiento de la caldera por falta de suministro eléctrico, en aquellas calderas con grandes cantidades de calor latente almacenado en alimentadores, refractarios o escorias calientes en la zona del hogar.

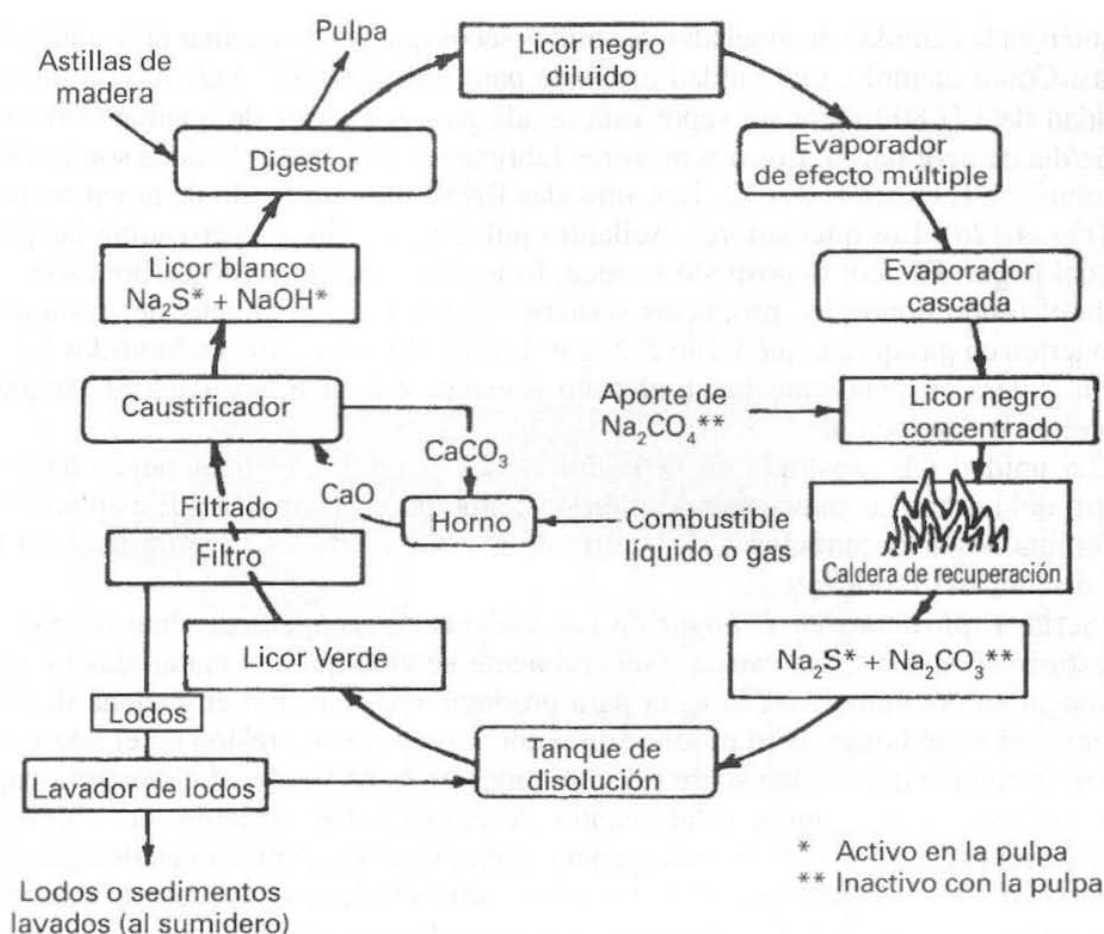


Figura 4.11. El ciclo «Kraft» de recuperación en papeleras recupera productos químicos utilizados para romper las fibras en los digestores quemando el licor negro en una caldera de recuperación.

Calderas de licor negro. El licor negro es un subproducto del proceso de la pulpa de madera en la industria papeleras. Véase la Figura 4.11. Las astillas de madera se calientan mediante vapor en una solución de sulfito sódico e hidróxido sódico en un gran depósito conocido como «digestor». El licor concentrado en el digestor fluye a un tanque de almacenamiento donde se une al licor diluido de las lavadoras de pulpa. Para que este licor pueda sostener una combustión, se concentra después por evaporación y se le añade la torta de sales machacadas hasta que contenga más del 58 por 100 en sólidos.

El licor concentrado se bombea a aproximadamente 104 °C a través de quemadores oscilantes que lo pulverizan hacia las paredes del hogar; los restos de combustible carbonizando se acumulan hasta que son demasiado pesados para caer al suelo o solera del hogar, donde la combustión se ve asistida por toberas de aire primario. Los gases y un pequeño porcentaje de partículas alcanzan la parte superior del hogar donde se admite aire secundario hasta completar el proceso de combustión.

Un porcentaje considerable de productos químicos en forma de cenizas sódicas se recupera de las cenizas de este proceso. Así, la combustión de este licor negro es doblemente productiva, es decir, generación de vapor y recuperación de cenizas sódicas. La capacidad de una caldera de recuperación de licor negro se expresa

también en la cantidad de toneladas de sólidos secos que puede quemar en veinticuatro horas. Como ejemplo, una unidad diseñada para trabajar a 112 kg/cm^2 con una capacidad de 177.800 kg/hr de vapor está tarada para ser capaz de quemar 800 toneladas/día de licor negro. Los dos mayores fabricantes en Estados Unidos son B&W y Combustion Engineering (CE). Las unidades B&W usan un fondo de hogar inclinado (Fig. 4.12a). Los quemadores oscilantes pulverizan el licor negro sobre las paredes del hogar. El licor depositado se seca, forma un conglomerado carbonoso y cae hacia el fondo donde los productos sódicos funden y los orgánicos del residuo se convierten en gas que se quema en el hogar. Los productos químicos fundidos fluyen por la solera en pendiente hacia el caño o espita y a su través caen al tanque o depósito de disolución.

La unidad CE mostrada en la Figura 4.12b pulveriza el licor negro hacia el centro del horno. La solera o parte inferior del hogar en la unidad CE es plana y se denomina hogar decantador. La mayoría de los otros detalles son similares en los dos diseños del fabricante.

Serias *explosiones en el hogar* de las calderas de recuperación han propiciado investigaciones sobre sus causas. Generalmente se cree que los materiales fusibles del hogar se combinan con el agua para producir una reacción en cadena del tipo detonación en el hogar. Esto produce un aumento rápido de presión en el hogar con ondas de choque que actúan sobre sus componentes estructurales. La industria papelera, compañías de seguros y fabricantes de calderas han dirigido sus objetivos, incluyendo procedimientos de emergencia, para evitar las explosiones de agua-materiales fundibles. La integridad de los tubos sufre tensiones y esfuerzos y se recomiendan inspecciones de las soldaduras por procedimiento NDT (no destructivo) en toda la zona del hogar, así como la monitorización de la concentración del licor negro. Entre los procedimientos recomendados está el drenaje rápido de la caldera a un nivel de 2,44 metros por encima del punto más bajo del suelo del hogar en cualquier momento que se sospeche que está entrando agua en la zona del hogar.

Los operadores de las calderas de licor negro tienen que estar seguros de que todas las bombas de licor negro se cierran simultáneamente cuando se inicie el procedimiento de emergencia del drenaje rápido, de otro modo puede resultar un incendio importante. Las industrias papeleras, compañías de seguros y fabricantes de calderas han formado un comité asesor de calderas de recuperación de licor negro (BLRBAC) para desarrollar e implementar los procedimientos de instalación, inspección y mantenimiento de estos tipos de calderas y para hacer que los operarios lleguen a estar completamente familiarizados con estas líneas maestras y procedimientos. Otra organización activa en el desarrollo de programas de auditoría y seguridad es el instituto americano del papel. Los equipos de las diferentes compañías visitan los lugares de situación de estas calderas para tomar buena nota de si se están siguiendo prácticas no seguras en el trabajo, mantenimiento e inspección de las calderas de recuperación de licor negro. Los puntos sobre los que se hace hincapié son la seguridad personal; integridad de las partes sometidas a presión, lo que incluye materiales, soldaduras, comprobación de la corrosión y erosión por métodos visuales y NDT; programas de tratamiento de agua; cumplimiento de las recomendaciones BLRBAC, incluyendo las últimas recomendaciones; sistemas de enclavamiento y seguridad y diseños a salvo de fallos recomendados e implementados y la comprobación de estos dispositivos; procedimientos de operación de emergencia

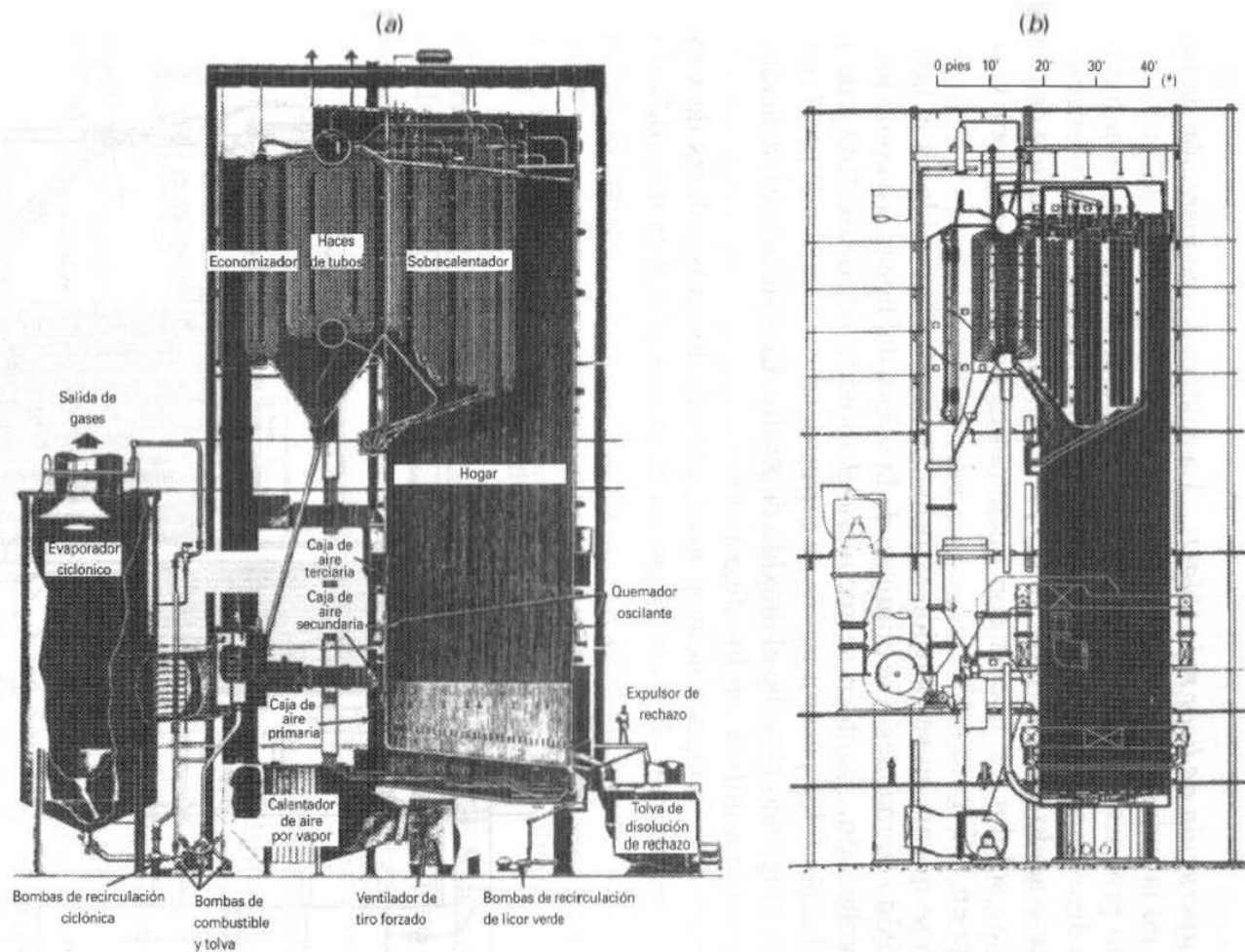


Figura 4.12. Dos tipos de calderas de recuperación de licor negro (lejía negra). (a) La caldera de licor negro B&W tiene el fondo del hogar inclinado hacia el tanque de disolución y recogida de rechazo fusible (fundido). (Cortesía de la Cía. B&W.) (b) Las características de la caldera CE (Combustion Engineering) son que tiene el fondo de hogar (solera) plana, siendo el combustible pulverizado y proyectado hacia el centro del hogar para su combustión mediante quemadores oscilantes. (Cortesía de la Cía. Combustion Engineering.)

que están en vigor en cada situación; programas de entretenimiento existentes para los trabajadores de la caldera de licor negro; programas de mantenimiento que están siendo aplicados a las calderas de recuperación de licor negro y el historial operativo y de fiabilidad de la situación.

El propósito de los programas BLRBAC y API es evitar las pérdidas por daños a la propiedad y a las personas que puedan suceder a consecuencia de las explosiones de las calderas de recuperación de licor negro.

Calderas de recuperación de licor rojo (MgO). La caldera de recuperación de licor negro se utiliza en la industria papelera cuando se utiliza el proceso del sulfito (de hidrógeno) como producto químico para romper o separar la lignina de la madera que se cuece en digestores. El proceso se considera como alcalino. Otro proceso se denomina «proceso ácido de licor rojo». El licor rojo con una concentración de cerca del 50 por 100 de sólidos, se quema con quemadores de atomización por vapor, como se muestra en la Figura 4.13.

El licor rojo se quema en suspensión y forma poca escoria o nada en el hogar. Las cenizas de óxido de magnesio se eliminan de la solera del hogar, así como los de los gases de combustión. También se recupera el dióxido de azufre (SO_2) de los gases o humos, haciéndolos pasar a través de torres de absorción donde un *slurry* o caldo de óxido de magnesio absorbe el dióxido de azufre. El resultado es un ácido de cocción que se vuelve a utilizar en los digestores.

El licor negro y el rojo no se queman igual; por ello los generadores de vapor utilizados no son los mismos. El licor negro en el proceso *kraft* es muy difícil de

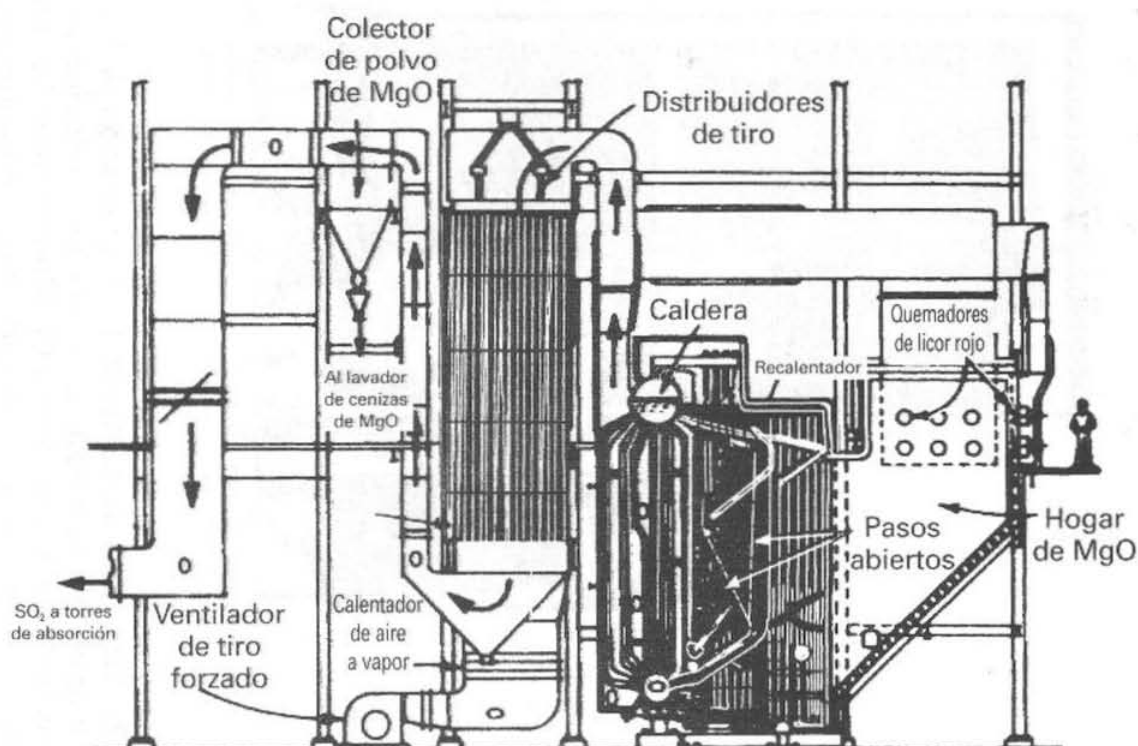


Figura 4.13. Caldera de tubos de agua para quemar licor rojo utilizada en el proceso de recuperación química y generación de vapor en la industria papelera. (Cortesía de Power magazine.)

quemar. Se necesitan grandes hogares para mantener la temperatura relativamente baja, porque el licor tiene un contenido de cenizas de baja temperatura de fusión muy elevado. Deben mantenerse colectores de material fundido sobre la solera refractaria en pendiente y asimismo una atmósfera reductora en la parte inferior del hogar para la conversión y proceso químico. También, como las superficies del recalentador y caldera tienen tendencia a revestirse de escoria, trabajan con bajas tasas de intercambio térmico. De ese modo, es necesario un soplado frecuente y limpieza de las superficies de calefacción.

El licor rojo en el proceso MgO (óxido de magnesio), de otro modo, se quema completamente en suspensión, haciendo poca o ninguna escoria. De este modo pueden utilizarse generadores de vapor más pequeños para una producción de vapor equivalente.

Corrosión del lado hogar (fuego). La corrosión y la erosión son un problema continuo en las calderas de recuperación de licor negro. La industria papelera ha establecido un programa de pruebas del espesor de los tubos a causa del riesgo inherente de que la rotura de un tubo permita entrar agua en el hogar y así exponer la unidad a una reacción química productos fundidos-agua y a una posible explosión del hogar. Los tubos extruidos de composite están siendo utilizados en las nuevas calderas como se ve en la Figura 3.24a. Finalmente, cuando es inminente el mínimo espesor de pared, los tubos viejos se recubren con una capa de material metalizante del tipo del acero inoxidable. Se requieren todavía inspecciones periódicas para determinar las condiciones del revestimiento o del placado metálico.

Se utiliza la emisión acústica para alertar a los operadores de una rotura o fallo tubular, lo mismo que existen termopares estratégicamente localizados, especialmente en los sobrecalentadores del tipo colgante, que requieren atención para asegurar la circulación en el arranque o durante las averías en planta.

Calderas de lecho fluidizado. Las calderas de lecho fluidizado están siendo desarrolladas para sacar partido de los grandes depósitos de carbón que existen, así como para sobreponerse al problema de contaminación que puede existir al quemar carbón. Los méritos de usar la combustión en lecho fluidizado son los siguientes:

1. Pueden quemarse combustibles con alto contenido en azufre sin tener que echar mano del tratamiento de los gases de combustión. Esto se cumple al inyectar caliza en el lecho, la cual absorbe el dióxido de azufre.
2. Se obtienen mayores rendimientos de combustión.
3. Son posibles menores temperaturas de combustión, que minimizan la formación de óxidos de nitrógeno y de escorias en el hogar.
4. Los productos de desecho formados a menores temperaturas de lecho son más fáciles de manejar y llevar al vertedero.

Un lecho fluidizado consta de partículas granuladas flotando sobre una parrilla o criba no pasante (para el material) a través de la cual se insufla aire a velocidad suficiente para elevar y hacer flotar las partículas. Se forman burbujas (calderas de lecho fluido burbujeante) hasta el punto en que la masa actúa ahora como un líquido en ebullición. Véase la Figura 4.14 de la página siguiente. Las partículas que se mantienen en suspensión son generalmente de caliza. El carbón pulverizado se in-

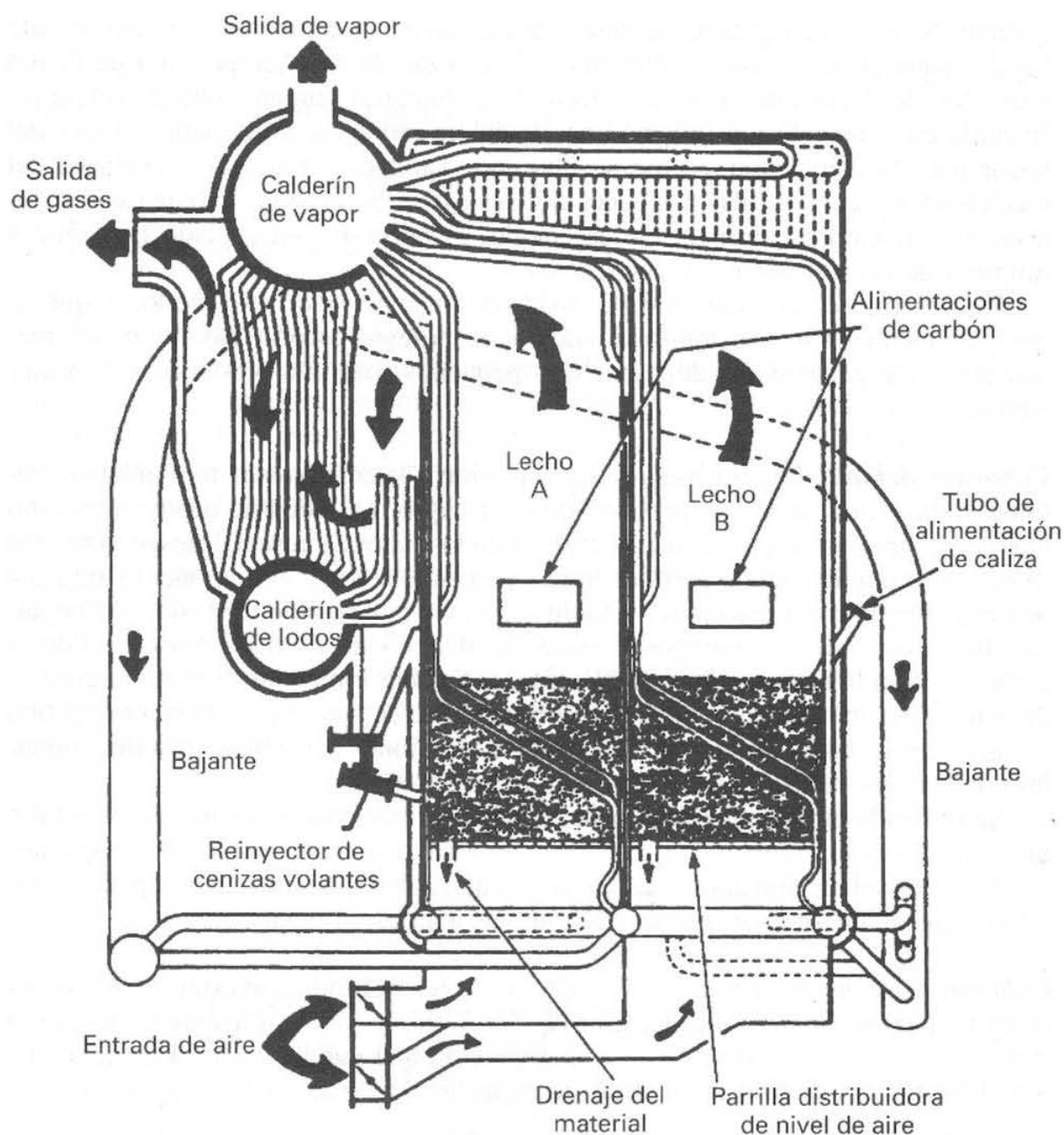


Figura 4.14. La caldera de lecho fluidizado atmosférico burbujeante de tipo tubos de agua genera 45.360 kg/hr de vapor a 43,15 bar. (Cortesía de Foster Wheeler Corp.)

yecta en la caliza y se quema. Para capturar el azufre del combustible, la temperatura del lecho se controla aproximadamente a 843 °C, a la que la captura óptima del sulfuro por la caliza ocurre formando sulfato cálcico. También se inyecta constantemente caliza en bruto en el lecho, mientras un sistema de drenaje por gravedad arrastra el material utilizado incluyendo partículas de ceniza del carbón. La baja temperatura de trabajo en el lecho fluido produce poca formación de óxidos de nitrógeno. Las partículas que son arrastradas por la corriente de gases de combustión pueden ser capturadas por precipitadores convencionales atmosféricos o por filtros de mangas.

Los *lechos atmosféricos* queman en el hogar a presión atmosférica. Éstos se clasifican además como sigue. Véase la Figura 4.15 de la página 158, que muestra los tres tipos.

1. *Lecho burbujeante*: Figura 4.15a. En este lecho, la profundidad durante la operación es aproximadamente de 1,20 a 1,50 metros y se reduce a 0,3 metros sin una elevada velocidad de aire.
2. *Lecho profundo*: Figura 4.15b. Trabaja de la misma manera que el lecho burbujeante, pero con mayores profundidades de combustible, arena y caliza.
3. *Lecho circulante fluidizado*: Figuras 4.15c y d. En esta configuración el lecho es más profundo que en las otras dos, con la fluidización extendiéndose desde la parte inferior del hogar o cámara de combustión hasta la parte superior del mismo. Las partículas de combustible que se están quemando y el material inerte son arrastrados desde la cámara de combustión al interior de un ciclón separador. Esto permite que los gases de combustión calientes y algunas partículas finas inertes pasen a la sección generador de vapor del conjunto de la caldera. El ciclón separador tiene pasos en la corriente que producen un efecto en espiral que separa determinados tamaños de partículas de la corriente de gases.

Nótese que el agua de alimentación se calienta en el intercambiador de calor exterior con generación de vapor que tiene lugar en la sección de convección de la caldera de lecho fluidizado.

La *combustión en lecho fluidizado presurizado* está siendo desarrollada en plantas de demostración; sin embargo, la investigación y desarrollo básicos han sido completados de modo que la utilización comercial de la misma está progresando. El sistema de lecho fluido presurizado trabaja a presiones por encima de los 10,5 bar y los gases calientes, después de una limpieza adecuada, se dirigen a un turbogenerador de gas, como se ve en la Figura 4.16 de la página 159. Los elementos fundamentales son una caldera, donde se produce y se recalienta el vapor para accionar un turbogenerador de vapor, y el turbogenerador de gas, que utiliza los gases de combustión en una disposición de ciclo combinado. La energía generada es de aproximadamente 50 por 100 por cada motor (motor primario). El combustor de cabecera, mostrado en la Figura 4.16, quema un gas de bajo poder calorífico proveniente de un hogar de pirólisis previo a la entrega de gas a la turbina de gas para aumentar la temperatura de gases hasta cerca de 1.370 °C. La tecnología de lecho fluido presurizado bajo desarrollo en proyectos de demostración tiene sus últimos objetivos en quemar el carbón limpio y eficazmente y usar los gases limpios para dar energía a una turbina de gas en una disposición de ciclo combinado. Se espera que esto aumente el rendimiento térmico de las plantas de combustión de carbón.

La *estanqueidad de las paredes tubulares* es un objetivo que preocupa a las calderas de lecho fluidificado por varios motivos, incluyendo la erosión de las cenizas volantes en el economizador, secciones de convección y superficies calefactoras de las paredes de los tubos de agua. Las altas velocidades de los gases y el flujo de gases con partículas abrasivas se citan entre los motivos. El control de la erosión sobre los tubos se practica hoy por medio de proyectores de capas de metal con aleaciones resistentes al desgaste. La soldadura con electrodos de revestimiento también se ha utilizado.

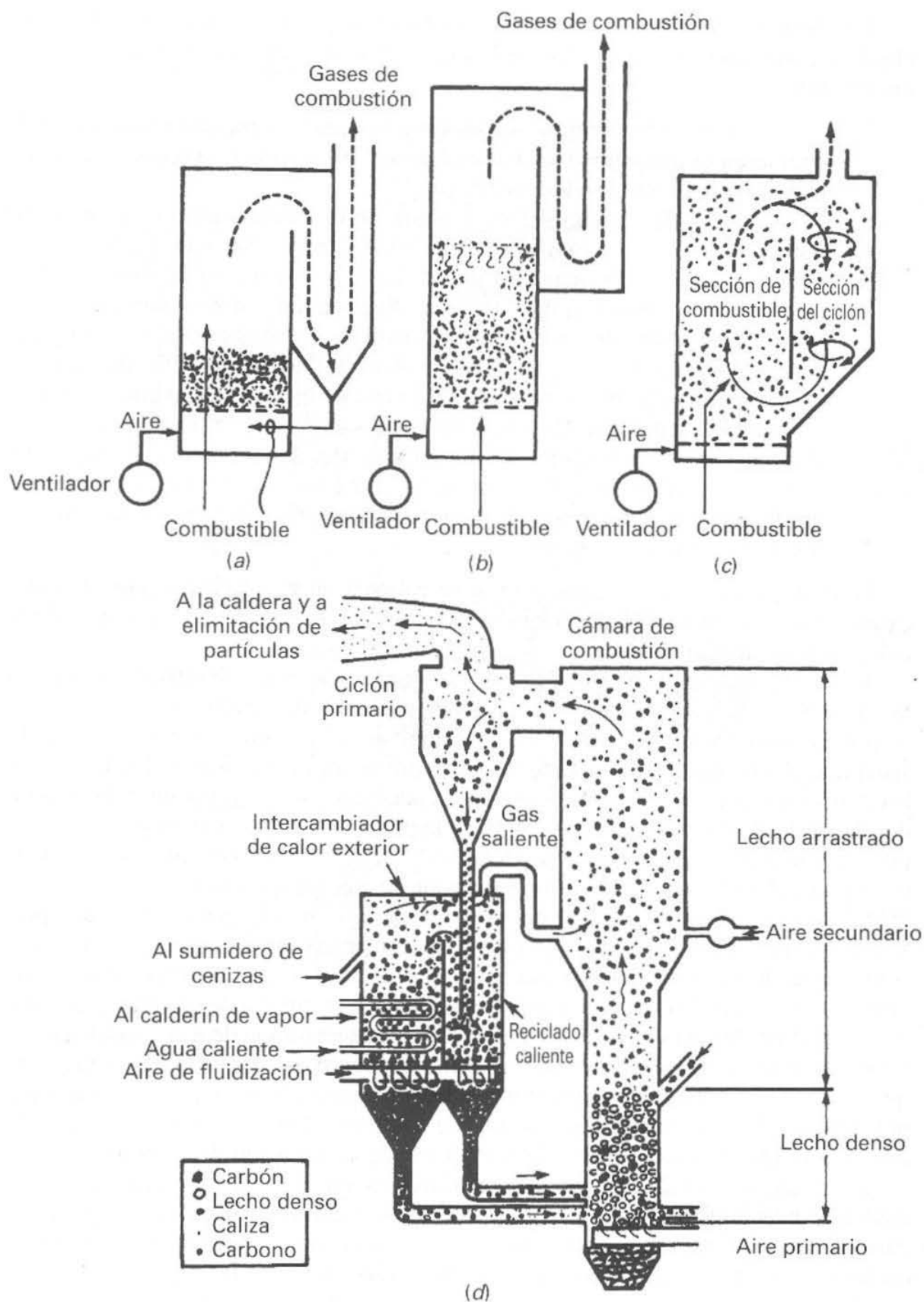


Figura 4.15. Tipos de lechos atmosféricos fluidizados. (a) Lecho burbujeante. (b) Lecho profundo. (c) Lecho circulante. (d) Un ciclón separa las partículas en el lecho circulante.

RESPUESTA: Cuando no se exceden las siguientes limitaciones: 16" (406,4 mm) de diámetro interior de la virola y 7 kg/cm² de presión.

3. ¿Cuándo debe tener una abertura de inspección practicable una caldera eléctrica?

RESPUESTA: Las calderas eléctricas de más de 141,6 l de volumen que no tengan una abertura de hombre deben tener una abertura de inspección en la parte inferior de la virola o cabezal de modo que la unidad pueda ser inspeccionada periódicamente para ver su incrustación u otros depósitos y ser limpiada de acuerdo a su estado. La abertura no podrá ser inferior a 3" (76,2 mm) de diámetro de tubo.

4. ¿Si una caldera eléctrica tiene una potencia de 750 kW, qué requisitos legales sobre capacidad y número de válvulas de seguridad debe cumplir?

RESPUESTA: Ya que la potencia es mayor de 500 kW se requieren dos o más válvulas de seguridad. La capacidad total debe ser al menos igual a: $750 \times 3,5 = 2.625$ Lb/hr (1.190,7 kg/hr).

5. ¿Qué tamaño mínimo debe tener la conexión de agua de alimentación de una caldera eléctrica?

RESPUESTA: No puede ser menor de 1/2" (12,7 mm).

6. ¿Qué tipo de caldera eléctrica no necesita sistema de corte por bajo nivel de agua?

RESPUESTA: Las calderas del tipo de electrodo no requieren corte por nivel bajo, porque el agua de la caldera cierra el circuito eléctrico de electrodo a electrodo. El nivel bajo de agua interrumpe el consumo eléctrico, sirviendo así al mismo propósito que el corte por nivel bajo.

7. ¿Cuándo se necesitan dos niveles de vidrio en las calderas eléctricas?

RESPUESTA: Ningún tipo de caldera de electrodo funcionando a presiones de más de 28 kg/cm² requiere dos niveles de agua de vidrio.

8. ¿Cuántas válvulas de purga se necesitan en una caldera eléctrica trabajando a más de 1,05 kg/cm² y con un contenido de agua de 95 galones (360 l)?

RESPUESTA: El Código requiere sólo una válvula de purga si el contenido de agua no excede de 100 gal (378,5 l).

9. ¿Cuál es la capacidad mínima de una válvula de seguridad determinada para una caldera de agua de alta temperatura?

RESPUESTA: Utilice la capacidad máxima de diseño en BTU/hora del combustible utilizado y divida ésta por 1.000 para obtener libras por hora de capacidad de descarga.

10. ¿Qué es un generador vaporizador de fluido?

RESPUESTA: Es un recipiente cerrado en el que un medio transmisor de calor distinto del agua es vaporizado a presión por aplicación de calor con el medio térmico de transferencia utilizado exteriormente al recipiente cerrado.

11. ¿Tienen las compañías de seguros contra incendios y las regulaciones legales locales requerimientos sobre calentadores de fase líquida o de fase vapor?

RESPUESTA: Sí, a causa del distinto riesgo de incendio que puede existir con algunos fluidos orgánicos incluyendo los aceites minerales.

12. ¿Pueden instalarse discos de ruptura entre un vaporizador orgánico y la válvula de seguridad requerida?

RESPUESTA: El Código permite esta disposición para minimizar pérdidas de fluido orgánico, pero deben añadirse ciertos requerimientos del Código. Por ejemplo:

1. El disco de ruptura debe tener un tarado de presión y temperatura de ruptura que no excedan la presión permisible del vaporizador y debe estar a una presión inferior a la de tarado de la válvula de seguridad.
2. Debe haber suficiente volumen después de la ruptura del disco para que la apertura de la válvula de seguridad no se vea afectada si la rotura del disco funciona.
3. Debe haber un manómetro, grifo de prueba o venteo abierto en el espacio existente entre el disco de ruptura y la entrada de la válvula de seguridad de modo que pueda determinarse la ruptura del disco de estanqueidad o una fuga, si existiese.

13. ¿Qué tipo de nivel de vidrio se requiere en un generador-vaporizador de fluido orgánico?

RESPUESTA: Debe ser del tipo de nivel de vidrio plano con estructura resistente de acero forjado. Los grifos de nivel no pueden utilizarse para evitar goteo o despilfarro de drenaje del fluido orgánico.

14. ¿Puede una válvula de seguridad tener una palanca manual instalada para protección de sobre presión en un vaporizador de fluido orgánico?

RESPUESTA: No se permite ninguna palanca para evitar descargas accidentales de fluido orgánico. La válvula de seguridad debería accionarse por lo menos una vez por año y probada fuera de la unidad para comprobar su ajuste y capacidad de descarga. La descarga de una válvula de seguridad instalada debería ir dirigida a un condensador o, como mínimo, a un punto seguro exterior al edificio.

15. ¿A que presión debe diseñarse un vaporizador?

RESPUESTA: Al menos 40 psi ($2,8 \text{ kg/cm}^2$) por encima de la presión de trabajo a la cual va a ser utilizado con el mismo factor de seguridad aplicado a este diseño por las regulaciones del Código.

16. ¿Qué dos requisitos regulan la selección de válvulas de seguridad para generadores de fase vapor y fase líquido orgánico?

RESPUESTA: El ajuste de presión no puede ser mayor que la presión máxima permisible de la unidad, y la capacidad debe ser por lo menos igual a la máxima producción (BTU/hr o kcal/hr) del generador.

17. ¿Qué tipo de válvulas debería utilizarse para aplicaciones HTHW?

RESPUESTA: Los asientos de válvula, agujas de cierre y cuerpos deberían estar hechos sólo de acero fundido, forjado o aleaciones de acero. Los asientos de válvula deberían ser de acero inoxidable al cromo-níquel para evitar la erosión y corrosión por el flujo de agua. Los tarados de presión deberían seguir el Código de calderas sobre válvulas de

corte, de alimentación y de purga, cuya norma es del 125 por 100 de la presión de trabajo permisible de la caldera.

18. ¿Necesitan nivel de agua de vidrio los generadores HTHW?

RESPUESTA: Sólo si la caldera de circulación natural tiene calderín que se utilice como vaso de expansión. Si la caldera está totalmente llena de agua a presión y tiene vaso de expansión exterior, el Código de calderas no requiere nivel de vidrio ni grifos de prueba.

19. En calderas de circulación forzada para sistemas HTHW, ¿qué provisión debería hacerse para evitar puntos calientes o falta de circulación en caso de fallo o rotura de bomba?

RESPUESTA: Debería instalarse un dispositivo de flujo o de presión diferencial para cortar el equipo de combustión en caso de que no fluya o circule agua.

20. ¿Debería utilizarse un corte de combustible por bajo nivel de agua en un generador HTHW del tipo de hogar suspendido?

RESPUESTA: Algunos estados (de EE. UU.) ahora requieren un corte por bajo nivel de agua o presión baja en los sistemas de calefacción de agua caliente. Por ello, este dispositivo de seguridad es incluso más necesario en una caldera de agua de alta temperatura. Debería instalarse sobre la caldera para cortar el combustible en caso de que el nivel caiga por debajo de un nivel peligroso.

21. Cite tres métodos de presurización en un sistema HTHW.

RESPUESTA: Tres métodos son:

1. Colchón de vapor.
2. Presurización por gas como el uso de nitrógeno como gas colchón inerte.
3. Presurización mecánica que hace uso de vaso de expansión y bomba.

22. Cuando se aplica un tratamiento químico a una caldera eléctrica de electrodo para minimizar la formación de revestimiento o capas de sales y otras consideraciones similares del agua, ¿qué otro factor debe considerarse en el tratamiento?

RESPUESTA: El efecto del tratamiento sobre la conductividad del agua. Si la conductividad se vuelve demasiado elevada (baja resistencia al flujo eléctrico), puede ocurrir un cortocircuito que puede dañar al electrodo y al aislamiento. Si la conductividad es demasiado baja (elevada resistencia al flujo de corriente), la unidad puede no ser capaz de alcanzar su producción.

23. Cite algunas ventajas típicas de quemar combustibles residuales en un generador de vapor.

RESPUESTA: Las ventajas para una planta que tiene un combustible residual como subproducto de un proceso de fabricación son:

1. Tener un medio barato y económico disponible para producir vapor en comparación con las calderas de combustible fósil que requieren la compra del combustible.
2. Disponer de un combustible que no está afectado por cortes de suministro de los combustibles líquidos y gaseosos.
3. El subproducto puede disponerse para el generador de vapor; de modo que los reglamentos de vertido de residuos poder ser obviados cuando el residuo tiene que verse en el campo o en un medio similar que puede afectar al medioambiente.

24. Cite tres requisitos de combustión para el combustible de residuos de madera en un generador de vapor.

RESPUESTA: En la combustión de residuos de madera el tipo de equipo de combustión a utilizar y factores similares a cumplir son los siguientes:

1. Evaporación de la humedad de la madera.
2. Destilación y combustión de los componentes volátiles del residuo.
3. Combustión de la materia carbonosa remanente en la madera.

25. ¿Cuál es la regulación del Código para establecer la presión permisible sobre un tubo bimetálico como los que se utilizan en calderas de combustible residual?

RESPUESTA: Por Código, sólo el interior o núcleo del espesor y diámetro del tubo se utilizan al calcular la presión admisible en tubos bimetálicos. El recubrimiento o revestimiento de acero inoxidable se considera como material resistente al desgaste, así como no contribuyente a la resistencia del tubo para soportar la presión.

26. En una planta de ciclo combinado, ¿cuál es la capacidad de la válvula de seguridad requerida, determinada por la caldera de recuperación de gases que utiliza poscombustión (combustión suplementaria)?

RESPUESTA: El fabricante de la caldera está requerido legalmente a calcular y estampar la capacidad máxima en kg/hr de la combinación de generación de vapor por calores perdidos más el añadido por la poscombustión o combustión suplementaria. La capacidad de la válvula de seguridad de presión debe ser igual, al menos, a aquella capacidad. Esto se aplica a las diferentes presiones en una caldera de calores perdidos de varias presiones.

27. ¿Qué es la cogeneración?

RESPUESTA: Cogeneración es una generación simultánea o producción coincidente de electricidad y calor para satisfacer las necesidades térmicas de vapor de un complejo de fabricación. Normalmente el vapor de alta presión se produce in situ con generadores de vapor. Este vapor de alta presión se pasa a través de un turbogenerador para obtener energía eléctrica y vapor de proceso, por extracción del vapor de la turbina a la presión necesaria por el proceso. Pueden usarse varias presiones de extracción. El balance de calor conjunto para una planta de cogeneración puede ser atractivo en comparación con comprar solamente energía eléctrica y generar vapor para el proceso por separado.

28. Cite tres razones por las cuales las calderas de recuperación de calores perdidos son normalmente del tipo de tubos de agua.

RESPUESTA: Las calderas de tubos de agua están favorecidas por las siguientes razones:

1. Son posibles grandes caudales máxicos de calores perdidos.
2. Las partículas sólidas atrapadas son recuperables más fácilmente en tolvas y equipo similar.
3. Es posible una mejor disposición de los tubos para evitar problemas de erosión y depósito de escorias.

29. Cite tres posibles focos de explosión del hogar en una caldera de recuperación del tipo de licor negro.

RESPUESTA:

1. Reacción entre el agua y las materias fundidas o bien fallo (rotura) de un tubo y/o una simple fuente de agua que entre en el hogar.
2. Reacción entre el licor negro diluido o de baja concentración que se derrama sobre el hogar y, a causa de su elevado contenido de agua con la materia fundida del hogar.
3. Ignición convencional de combustible inquemado proveniente de los quemadores auxiliares que usan gas o gas-oil (fuel-oil) como combustibles, con la ignición iniciando una explosión en el lado hogar cuando el combustible acumulado se inflama.

30. Cite los tres tipos de combustión atmosférica en lecho fluidizado.

RESPUESTA: Lecho burbujeante, lecho profundo y lecho circulante.

31. ¿Cuál es la principal causa de corrosión en el lado hogar de las calderas de recuperación de licor negro?

RESPUESTA: La corrosión por sulfuración, causada por el azufre contenido en los gases de combustión bajo condiciones reductoras parece ser la causa principal de desgaste en el lado metálico de los tubos, aunque el mecanismo de corrosión no está totalmente desvelado. Es, pues, esencial establecer un programa de comprobación del espesor de los tubos del hogar o de otros tubos expuestos al lecho fluidizado de materias en el hogar para evitar cualquier corrosión a través de los tubos por rociado de agua en el lecho con materiales fusibles, y así producir una violenta reacción de materias fundidas-agua, tipo explosión en la caldera de recuperación.

32. ¿Cuál es la diferencia principal entre el lecho circulante y el lecho burbujeante en la combustión en lecho fluidizado?

RESPUESTA: En la combustión de lecho fluidizado circulante, hay velocidades de aire más elevadas a través de la zona de combustión, comparado con el lecho atmosférico burbujeante. Esta velocidad del aire aumentada impulsa pequeñas partículas de combustible, caliza y cenizas hacia la parte superior del hogar. Esto aumenta la capacidad térmica de las partículas circulantes y gases calientes, lo que produce una temperatura más uniforme en el hogar. El mayor tiempo de combustión y de captación de azufre en el hogar comparado con un diseño de lecho fluido no circulante da como resultado:

1. Mayor eficiencia de combustión.
2. Reducida formación de CO y NO_x .
3. Mejor utilización de la caliza para la recolección de SO_2 . También un ciclón mecánico en una combustión de lecho fluido circulante quemando después de la sección de hogar ayuda a eliminar las partículas arrastradas en los gases de combustión, ayudando a su vez a convertir cualquier partícula inquemada de combustible en energía calorífica.