

Capítulo 11

COMBUSTIÓN, QUEMADORES, CONTROLES Y SISTEMAS DE SEGURIDAD DE LLAMA. PROCESO BÁSICO DE COMBUSTIÓN

PROCESO BÁSICO DE COMBUSTIÓN

El proceso básico de combustión es una forma especial de oxidación en que el oxígeno del aire se combina con elementos combustibles, que generalmente son carbono, hidrógeno y en menor medida azufre. Importante para los estudiosos de combustión son la termodinámica química y la cinética de la llama y velocidad de las reacciones. Se necesita una mezcla adecuada de combustible y aire, así como una temperatura de ignición para que el proceso de combustión continúe. El combustible debe prepararse de forma que se haga posible dicho proceso a través de la mezcla de combustible y aire. El término *inflamabilidad* se utiliza para describir la capacidad de quemarse, o realmente su habilidad para convertirse en gas de forma que la combustión pueda tener lugar.

Las reacciones químicas deben satisfacer tres condiciones para que tengan lugar en el proceso de combustión:

1. Es necesaria una adecuada proporción entre combustible y oxígeno (o aire) con los elementos combustibles, como se demuestra por las ecuaciones químicas.
2. La mezcla de combustible y oxígeno (o aire) debe llevarse a cabo, de modo que una mezcla uniforme esté presente en la zona de combustión y así cada partícula de combustible tenga aire alrededor para ayudar en la combustión. Los combustibles sólidos normalmente se convertirán primero en gas por el calor y la presencia de aire. Los combustibles líquidos se vaporizan a gas y después arden. La atomización de los líquidos incrementa su mezcla con

aire y la vaporización a gas. La pulverización del carbón tendrá el mismo efecto.

3. La temperatura de ignición se establecerá y será monitorizada de forma que el combustible continúe su ignición sin calor externo cuando la combustión arranque.

Los elementos fundamentales que producen calor en los combustibles (excepto para reacciones atómicas y electricidad) son el carbono, el hidrógeno y sus compuestos. El azufre, cuando se oxida rápidamente, es también fuente de alguna energía térmica, pero su presencia en los combustibles presenta efectos nocivos. La combustión de carbón, aceites combustibles derivados del petróleo o gas natural es una reacción que implica al combustible y al oxígeno del aire. El aire tiene un 23 por 100 de oxígeno en peso y un 21 por 100 en volumen. El resto del aire es en su mayor parte nitrógeno, que no toma parte real en la combustión pero afecta al volumen de aire necesario y a la formación de NO_x . La tabla de la Figura 11.1 representa algunas reacciones de combustión típicas para diversos elementos constituyentes de los combustibles. Siempre son el carbono, el hidrógeno o el azufre los que producen la reacción química calorífica al combinarse con el oxígeno.

Como el oxígeno del aire se conoce que es el 23,15 por 100 en peso y el 21 por 100 en volumen (en caso de ecuaciones de combustión) puede calcularse la cantidad de aire requerido. Por ejemplo, en la combustión completa del carbono, puede concluirse que se requieren $2\frac{2}{3}$ lb (1,21 kg) de oxígeno para quemar 1 lb (0,454 kg) de carbono. La cantidad de aire necesario para quemar 1 lb (0,454 kg) de carbono sería pues:

$$A_R = \frac{\text{cantidad de oxígeno}}{\% \text{ de oxígeno en aire por peso}} = \frac{2,67}{0,2315} = 11,52 \text{ lb (5,22 kg)}$$

Esto se indica en la Figura 11.1.

La combustión incompleta da como resultado humos y un menor rendimiento de la operación. Para obtener una combustión completa, el volumen del hogar deberá ser adecuado para permitir la combustión completa de las partículas de combustible antes de que pasen a las superficies calefactoras y sean enfriadas por debajo de su temperatura de ignición.

Para poder mezclarse íntimamente el oxígeno con los gases y partículas del combustible que se está quemando, la acción de la llama debe producir una turbulencia. La flexibilidad del control de llama puede verse afectada por el control de suministro de aire primario. Aire primario es el que conduce el combustible a los quemadores o se mezcla con el combustible en los quemadores o a través del lecho de combustible. Véase la Figura 11.2a de la página 412. El aire secundario se suministra para quemar el combustible de forma que el oxígeno pueda unirse en combustión en los puntos más ventajosos.

Si no se suministra suficiente aire u oxígeno, la mezcla es rica en combustible; así que la llama se reduce, con una llama resultante que tiende a ser larga y con humo. La combustión tampoco es completa, y los gases (producto de la combustión) tendrán combustible no quemado, como partículas de carbono o monóxido de carbono en vez de dióxido de carbono. Se desarrollará menos calor por el proceso de combustión. Si se suministra demasiado oxígeno o aire, la mezcla y la combustión

Elemento combustible	Símbolo	Reacción química	Productos de la combustión	Volúmenes	Pesos por libra de combustible						Poder calorífico, BTU lb
					Oxígeno, lb	Nitrógeno, lb	Aire, lb	Productos gaseosos, lb	ft ³ O ₂ lb combustible	ft ³ aire lb combustible	
Carbono	C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Dióxido de carbono	1 vol. C + 1 vol O ₂ = 1 vol CO ₂	2,67	8,5	11,52	12,52	31,65	151,3	14.600
Carbono	C	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	Monóxido de carbono	2 vol C + 1 vol O ₂ = 2 vol CO	1,33	4,43	5,76	6,76	—	—	4.440
Monóxido de carbono	CO	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	Dióxido de carbono	2 vol CO + 1 vol O ₂ = 2 CO ₂	0,57	1,90	2,47	3,47	6,79	32,5	10.160
Hidrógeno	H	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	Agua	2 vol H ₂ + 1 vol O ₂ = 2 vol H ₂ O	8	26,56	34,56	35,56	94,8	453	62.000
Metano	CH ₄	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	Dióxido de carbono y agua	1 vol CH ₄ y 2 vol CO ₂ = 1 vol CO ₂ + 2 vol H ₂ O	4	13,28	17,28	18,28	47,4	226,5	23.850
Etileno	C ₂ H ₄	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	Dióxido de carbono y agua	1 vol C ₂ H ₄ + 3 vol O ₂ = 2 vol CO ₂ + 2 vol H ₂ O	3,43	11,38	14,81	15,81	—	—	21.600
Etano	C ₂ H ₆	$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	Dióxido de carbono y agua	2 vol C ₂ H ₆ + 7 vol O ₂ = 4 vol CO ₂ + 6 vol H ₂ O	3,73	12,40	16,13	17,13	44,5	212	22.230
Azufre	S	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	Dióxido de azufre	1 vol S + 1 vol O ₂ = 1 vol SO ₂	1	3,32	4,32	5,32	11,87	56,7	4.050

Figura 11.1. Reacciones de combustión de los elementos del combustible con sus pesos y volúmenes de combinación y poder calorífico del combustible.

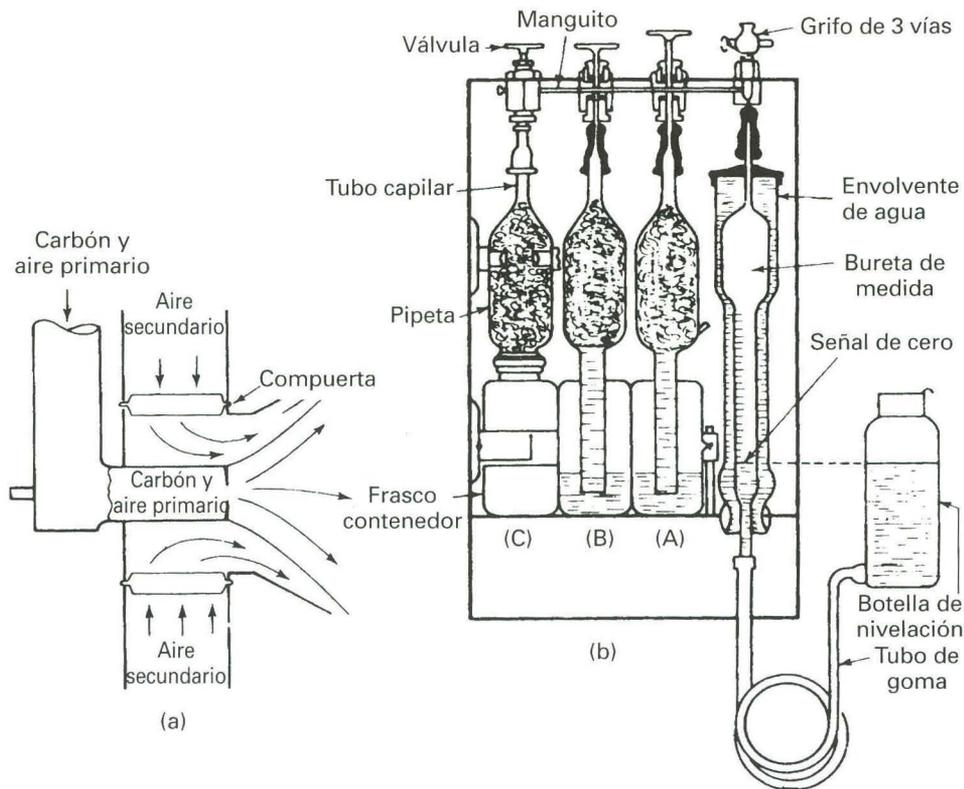


Figura 11.2. a) El aire primario en el quemador turbulento ayuda a la combustión del combustible y el aire secundario completa la combustión en el hogar. (El aire secundario es dos tercios del total.) b) Aparato de Orsat usado para analizar los gases de la combustión. Nuevos sensores permiten la lectura continua de los gases constituyentes.

son pobres, dando lugar a una llama más corta y más limpia o clara. El exceso de aire se lleva algo del calor desprendido en el hogar y lo traslada al exterior por la chimenea. La combustión debería efectuarse siempre con exceso de aire para asegurar que todo el combustible se quema correctamente y así obtener el mejor rendimiento del desprendimiento de calor. Esto también reduce la formación de humo y depósitos de hollín, lo que hoy, con las estrictas leyes antipolución, es importante.

Cuando los gases de combustión salen por la chimenea como humo negro, es indicio de insuficiente aire. Demasiado aire, formalmente produce un denso humo blanco. Un humo transparente, ligeramente gris, saliendo de una chimenea, es signo de una relación razonablemente buena aire/combustible. Por supuesto, un análisis más exacto se hace con un analizador de gases, como el aparato de Orsat. A partir de este análisis, puede determinarse el porcentaje bien de exceso o de insuficiencia de aire. Véase la Figura 11.2b.

Analizadores de gases de combustión. El analizador portátil de Orsat, mostrado en la Figura 11.2b, se usa para determinar los porcentajes en volumen de dióxido de

carbono, oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno en los gases de combustión. Un análisis más completo debe incluir los porcentajes de hidrógeno e hidrocarburo que puedan aparecer en los gases de combustión. Sin embargo, la combustión de hidrógeno produce vapor de agua que no aparece en un análisis de gases secos en los gases de combustión. El mecanismo básico del aparato de Orsat se compone de unas botellas que contienen diferentes soluciones químicas para absorber los diferentes gases de la combustión. Por ejemplo, el dióxido de carbono es absorbido por la botella que contiene potasa cáustica; el oxígeno, por la botella que contiene ácido pirogálico; y el monóxido de carbono, por la que contiene una solución ácida de cloruro de cobre. El porcentaje de nitrógeno se obtiene por sustracción de 100 de la suma de los otros gases. Los operadores deberían seguir las instrucciones que se suministran normalmente para este tipo de instrumentos. Su objetivo fundamental es ajustar las relaciones aire/combustible.

Monitorización continua de emisiones. Las regulaciones gubernamentales sobre emisiones de SO_2 y NO_x han impulsado el crecimiento de nuevos sistemas de combustión, así como la nueva instrumentación y controles electrónicos para mantener las relaciones aire/combustible y emisiones dentro de las restricciones jurisdiccionales. Otro objetivo es incrementar la tasa térmica por monitorización de los combustibles en el gas, porque la mezcla pobre de aire y combustible en el quemador y en el hogar da como resultado la formación de monóxido de carbono no quemado en los gases de combustión.

Los analizadores de O_2 pueden medir el porcentaje de O_2 en los gases de combustión; esto permite el ajuste fino del proceso de combustión para obtener la mejor relación aire/combustible, aumentando así el rendimiento de la combustión. El analizador de O_2 más corrientemente utilizado es la unidad de óxido de zirconio, que consta de una sonda y una unidad eléctrica. La sonda de óxido de zirconio, construida en acero inoxidable, comprende un filtro de polvo cerámico, un limitador de llama, una celda detectora, una celda calefactora y un termopar. Un conductor flexible conecta la sonda a la unidad electrónica en la que se sitúan un sistema de transmisión, el control con circuitos del calentador de la sonda y una bomba de aire.

La formación de NO_x en el hogar es la combinación del nitrógeno del combustible con el oxígeno, denominado «combustible NO_x », mientras que el de producción en la zona de alta temperatura donde se combina el nitrógeno con el oxígeno del aire se denomina « NO_x térmico». Cuando se quema gas natural y aceites de destilación del petróleo ligeros, la mayor parte del NO_x es del tipo térmico, mientras que los aceites pesados (fuel-oil) y la combustión del carbón producen NO_x combustible. Los límites de emisión de NO_x se especifican normalmente en términos de libras (kg) de NO_x por millones de BTU (kcal) desprendidas o de lb (kg)/hora. En Estados Unidos, Nueva York recientemente estipulaba 4,5 ppm en volumen para la emisión de NO_x y 15 ppm en volumen para la emisión de CO para una central eléctrica independiente utilizando el ciclo combinado de gas con la combinación de turbina de gas y caldera de recuperación de calores perdidos. Es fundamental para los operadores conocer sus limitaciones jurisdiccionales de emisiones para estar seguros de que el equipo de combustión cumple con los límites gubernamentales impuestos. Los analizadores de emisiones instalados para este propósito, y para controlar la relación aire/combustible, deberían estar cuidadosamente monitorizados para un

funcionamiento adecuado con todos y cada uno de los aparatos de control conectados a ellos. Es también importante mantener registros de las lecturas de las emisiones para cualquier revisión gubernamental.

Relaciones aire/combustible. Las relaciones aire/combustible deben mantenerse a un nivel tan bajo como sea posible con el fin de ahorrar combustible. Sin embargo, a no ser que se utilice exceso de aire en la cámara de combustión, puede tener lugar una combustión incompleta, que también malgastará combustible, pudiendo haber riesgo de explosión por ignición retardada en el hogar del combustible no quemado. Para asegurar una combustión completa, debe suministrarse exceso de aire en cantidades que varían entre el 20 y el 30 por 100, dependiendo del combustible utilizado, la carga de caldera y su configuración. El exceso de aire está también influido por las necesidades de controlar las emisiones de NO_x y SO_2 . Los analizadores de combustión que usan técnicas de absorción infrarroja son utilizados para las lecturas de CO y CO_2 , que pueden alimentar a un controlador con señales de entrada actuando sobre el grado de carga de la caldera. Los conceptos de retroalimentación se utilizan para controlar automáticamente las compuertas de aire en función de la carga, mientras el controlador también varía la relación entre la compuerta de aire y la válvula de combustible a medida que la tasa de combustión varía con la carga. El sistema se denomina *control automático del bucle o lazo de combustión de la caldera*. Como puede observarse, su objeto fundamental es mantener una relación constante aire/combustible.

El rendimiento de la caldera también puede estar afectado por una transferencia de calor pobre debida a depósitos de hollín o a depósitos de cal en el lado de agua de la caldera. Por otra parte, una monitorización seguida a intervalos fijos del combustible consumido en BTU (kcal) *versus* carga en BTU (kcal), es otro método de comprobación del rendimiento general de la caldera.

El análisis de las medidas de los gases de combustión puede utilizarse para calcular el peso de aire utilizado por kilogramo de combustible quemado según la siguiente ecuación:

$$W_A = \frac{28N_2}{12(\text{CO}_2 + \text{CO})(0,769)} \left(\frac{W_f C_f - W_r C_r}{W_f \times 100} \right)$$

donde: CO_2 = porcentaje de dióxido de carbono en los gases de combustión en volumen.

CO = porcentaje de monóxido de carbono en los gases de combustión en volumen.

N_2 = porcentaje de nitrógeno en los gases de combustión en volumen.

W_f = peso del combustible quemado en lb (kg).

C_f = contenido de carbono del combustible que se obtiene en un análisis final.

C_r = porcentaje de carbono no quemado de las cenizas y del rechazo.

W_r = peso en lb (kg) de cenizas y del rechazo del combustible quemado (W_f).

W_A = peso real del aire en lb (kg) por lb (kg) de combustible quemado.

Ejemplo. Para ilustrar el uso de esta ecuación, suponga que 700 lb (318 kg) de carbón se queman en una caldera. El contenido de carbono de este carbón es del 68 por 100. Las cenizas y escorias después de la combustión suponen 60 lb (27,24 kg), siendo el contenido de carbono en las escorias del 7,8 por 100. El análisis de humos mostró los siguientes porcentajes en volumen:

$$\text{CO}_2 \text{ (dióxido de carbono)} = 11,9\%$$

$$\text{N}_2 \text{ (nitrógeno)} = 80,9\%$$

$$\text{CO (monóxido de carbono)} = 1\%$$

$$\text{O}_2 \text{ (oxígeno)} = 7,3\%$$

¿Cuál es el peso real de aire utilizado para quemar este carbón? Dando valores y sustituyendo, tenemos:

$$\text{CO}_2 = 11,9\% \quad W_f = 700 \text{ lb (318 kg)}$$

$$\text{CO} = 1\% \quad C = 68\%$$

$$\text{N}_2 = 80,9\% \quad C_r = 7,8\%$$

$$W_r = 60 \text{ lb (27.24 kg)}$$

Sustituyendo estos valores en la citada ecuación, obtendremos:

$$\begin{aligned} W_A &= \frac{28(80,9)}{12(11,9 + 1) (0,769)} \left[\frac{700(68) - 60(7,8)}{700 \times 100} \right] \\ &= 19,0(0,68) = \\ &= 12,9 \text{ lb aire/lb de combustible (12,81 kg de aire/kg de combustible)} \end{aligned}$$

o

$700 \times 12,81 = 9.030 \text{ lb de aire para } 700 \text{ lb de carbón (4.074,4 kg de aire para } 318 \text{ kg de carbón)}$

Otra ecuación útil se usa para determinar el peso de gases de combustión, W_{fg} , formado al quemar una libra (kg) de combustible (y determinado por los porcentajes de CO_2 , CO , O_2 , W_f , C_f , W_r y C_r anteriores)

$$W_{fg} = \frac{4\text{CO}_2 + \text{O}_2 + 700}{3(\text{CO}_2 + \text{CO})} \left(\frac{W_f C_f - W_r C_r}{W_f \times 100} \right)$$

Ejemplo. El mismo carbón se está quemando con el mismo análisis que se vio en el ejemplo previo. Sustituyendo obtendremos:

$$\begin{aligned} W_{fg} &= \frac{4(11,9) + 7,3 + 700}{3(11,9 + 1)} \left[\frac{700(68) - 60(7,8)}{700 \times 100} \right] \\ &= 20,06(0,68) \\ &= 13,6 \text{ lb de gases/lb de combustible quemado} \end{aligned}$$

o $13,6 \times 700 = 9.520 \text{ lb de gases de combustión para } 700 \text{ lb de carbón}$

Utilizando el calor específico (BTU (kcal) por lb(kg) y grado de aumento de temperatura de un gas), es posible calcular el calor perdido por la chimenea. Utilice la ecuación:

$$H_L = WC_p(T_2 - T_1)$$

donde: H_L = calor perdido por los gases.

W = peso del gas que sale por la chimenea, normalmente en lb (kg)/hora.

C_p = calor específico medio de los gases.

Puede tomarse aproximadamente 0,25 kcal/kg °C

T_2 = temperatura en chimenea, °F(°C).

T_1 = temperatura del aire entrante en el hogar, °F(°C).

Ejemplo. En el problema previo, 9.520 lb/hr (4.218 kg/hr) de gases salen por la chimenea. Suponga que la temperatura en la chimenea es de 650 °F (343 °C) y que la temperatura del aire de entrada es de 80 °F (26,7 °C). Así, el calor perdido por la chimenea será:

$$\begin{aligned} H_L &= 9.520(0,25)(650 - 80) \\ &= 1.356.600 \text{ BTU/hr (334.277 kcal/hora)} \end{aligned}$$

Ya que se quemaron 700 lb (317,8 kg) de carbón, con un poder calorífico supuesto de 14.500 BTU/lb (8.048 kcal/kg) de energía total de entrada.

$$700 \times 14.500 = 10.150.000 \text{ BTU/hr (2.557.654,4 kcal/hora)}$$

El porcentaje de calor que se va por la chimenea es, pues, de:

$$\frac{1.356.600}{10.150.000} = 13,4 \%$$

Suponiendo que 318 kg de carbón con un poder calorífico de 8.048 kcal/kg, desprende una energía de 2.559.264 kcal. Esto indica un rendimiento de caldera de: $100 - 13,4 = 86,6 \% \approx 87 \%$.

Tiro. El tiro provee la presión diferencial en el hogar para asegurar el flujo de gases. Sin tiro, se producirá una estratificación en el proceso de combustión, y la llama o proceso de combustión muere por falta de aire. El tiro empuja o impulsa el aire y los gases resultantes de la combustión a través de la caldera y por el interior de la chimenea. El tiro vence la resistencia al flujo presentada por las obstrucciones de tubos, paredes del hogar, baffles (directores), compuertas y revestimiento de chimenea (y también escorias).

El tiro natural se produce por una chimenea por la que la caldera evacua los gases. El aire frío admitido por el hogar (por medio de las compuertas de entrada) empuja para desplazar los gases calientes más ligeros del hogar (por diferencia de densidad). Así, los gases calientes suben (como los globos, por efecto chimenea) produciendo el tiro natural.

El tiro mecánico se produce artificialmente por medio de ventiladores de tiro inducido (aspirado) o forzado (soplado). La chimenea es necesaria incluso en las instala-

ciones de tiro mecánico para ventilar los productos de combustión de manera que no sean dañinos para los alrededores. Las calderas modernas, incluyendo las de tipo doméstico, utilizan alguna forma de tiro mecánico. Los quemadores domésticos pueden llevar un ventilador incluido en la unidad del quemador (o si no llevar campana y chimenea extractora de gases).

NORMAS DE EMISIÓN DE CALDERAS INDUSTRIALES

Los programas de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, Estados Unidos), efectivos desde 1989, exigen un límite de emisión de 0,545 kg de SO₂ por cada 252.000 kcal (106 BTU) para calderas de carbón de una producción por encima de 2,52 millones de kcal/hora de potencia. Para calderas por debajo de 18,8 millones de kcal/hora de potencia, la eliminación de SO₂ debe ser adicionalmente del 90 por 100 como mínimo.

Las normas de emisión de NO_x se aplican a calderas de leña, carbón y combustibles líquidos. Esto exige que el NO_x esté limitado a 0,454 kg por cada 252.000 kcal/hora sin importar el tamaño o potencia de la caldera.

Los sistemas de eliminación de SO₂ son aplicables especialmente a las grandes plantas de combustión de carbón. La nueva norma de limpieza medioambiental (Acta del Area Limpio) del gobierno federal de Estados Unidos lo hace obligatorio en todos los sistemas de combustión para limitar no sólo la emisión de partículas, normalmente tratada por los filtros de mangas o precipitadores ciclónicos, sino también para limitar las emisiones de SO₂ y NO_x, que son productos gaseosos. El énfasis actual en la limpieza de la emisión de gases de chimenea está puesto en la de sulfuración de dichos gases, pero también los óxidos de nitrógeno han comenzado a ser objeto de control de emisiones. Se utilizan los sistemas de limpieza húmeda de gases (*scrubbing*) para limpieza del flujo de gases de incineradoras y calderas. Los tres principales tipos de sistemas por vía húmeda que hay diseñados son: el tipo de caliza o sistema de cal, el de papilla (*slurry*) de óxido de magnesio y el sistema de doble álcali (doble alcalinidad). Los sistemas de limpieza por vía húmeda son un gasto adicional, y en la generación eléctrica absorben del 2 al 7 por 100 de la potencia total de la planta a causa del accionamiento de bombas, ventiladores y equipos similares que son necesarios. El material de construcción para los sistemas por vía húmeda debe ser resistente a los ácidos y a la abrasión, y también debe soportar elevadas temperaturas durante los tiempos y condiciones habituales de uso de las plantas. El acero inoxidable y las aleaciones de aceros al níquel son las utilizadas para evitar las tensiones de rotura por corrosión en presencia de cloruros. El acero medio o suave se utiliza también revestido de goma, así como los revestimientos reforzados de poliéster o fibra de vidrio y revestimientos similares a prueba de ácidos. La Figura 11.3 de la página siguiente muestra un típico sistema de limpieza por vía húmeda con caliza (carbonato cálcico: CaCO₃) que se añade al sistema de flujo de gases de combustión después del precipitador de caldera. El gas de combustión, después de haberse limpiado en el precipitador, entra en la parte superior de las torres de lavado y pasa a través de la papilla de la piedra caliza, papilla que es rociado en la torre desde arriba. La reacción química entre el SO₂ y la caliza produce la eliminación del 80 al 85 por 100 del

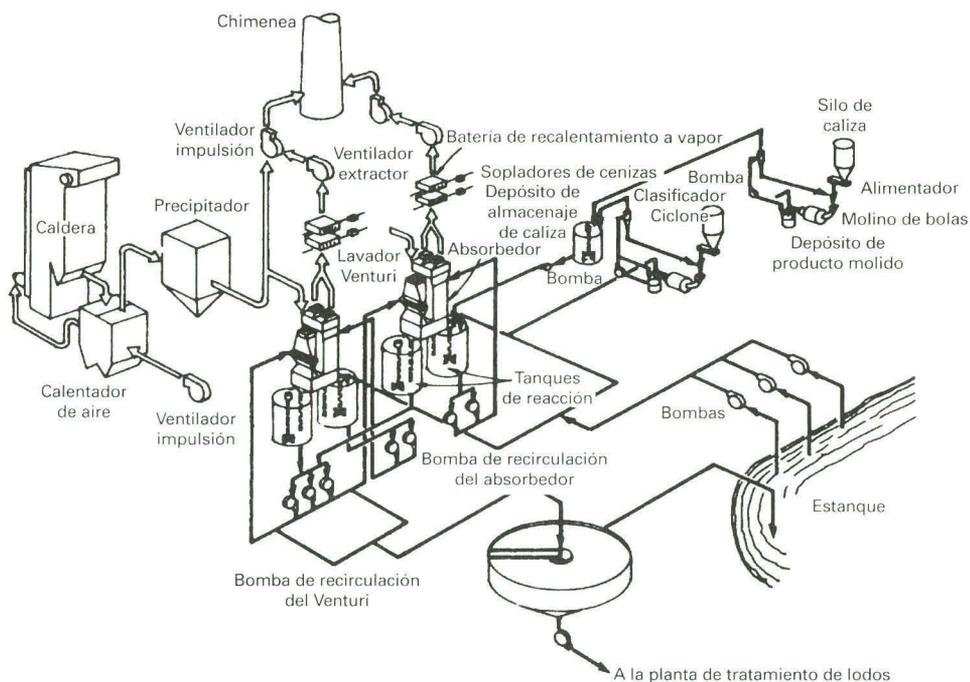


Figura 11.3. Sistema neutralizador lavador de humos (gases) con caliza para eliminar SO_2 de los gases de combustión.

SO_2 de los gases de combustión. El lodo así formado (de CaSO_4) debe ser tratado en plantas adecuadas.

Combustión en lecho fluidizado. Este tipo de combustión ha recibido atención como medio de controlar las emisiones de NO_x y SO_2 a la atmósfera. Véase la Figura 11.4a. Esto se realiza introduciendo con el combustible un material inerte, como arena, sílice y alúmina, así como un absorbente como caliza en un lecho agitado de combustible. El lecho se mantiene en suspensión por medio de la acción del aire primario de combustión que se introduce por debajo del suelo o solera de combustión. Véase el Capítulo 4 para una descripción de las calderas usadas en este proceso. La utilización de tubos generadores de vapor en lecho fluido requiere una consideración especial para evitar la erosión y desgaste anormal con los tubos. Los tubos compuestos, que se muestran en la Figura 11.4b, se usan en estas calderas como también se usan los tubos de acero inoxidable, que se emplean para reducir el efecto de la erosión y corrosión sobre los tubos en lecho fluidizado.

Los sistemas de control de la emisión de NO_x se vienen aplicando no sólo a calderas, sino también, por requerimiento legislativo, a calentadores y hornos de la industria petroquímica y a las emisiones de las turbinas de gas. Las espesas formaciones de humos en las zonas industriales son una consecuencia de las emisiones de NO_x , que combinado con gases reactivos de tipo orgánico, forman ozono (O_3).

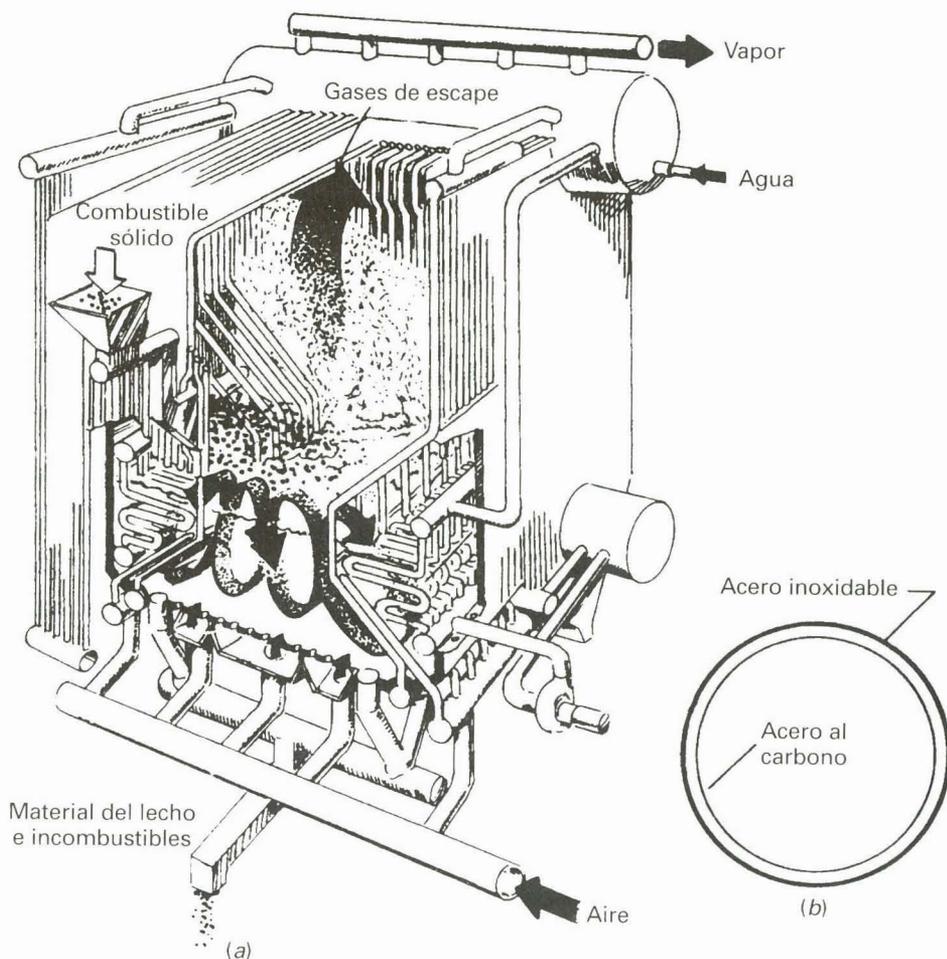


Figura 11.4. (a) La combustión en lecho fluidizado expone los tubos a la erosión y corrosión en el lecho fluidizado. (Cortesía de *Power magazine*.) (b) El tubo compuesto tiene una capa de acero inoxidable laminado sobre el acero al carbono para protección contra la corrosión.

Mientras que el ozono se necesita en la atmósfera superior para bloquear la radiación solar peligrosa, se considera cancerígeno cuando se mezcla con el aire ambiente, y representa así un peligro para la salud si se concentra por encima de ciertos límites o umbrales peligrosos. La reducción de NO_x en el proceso de combustión puede tomar muchas formas, dependiendo de la caldera o proceso de combustión implicado. Entre los métodos utilizados están:

1. Control estrecho de la relación aire/combustible, llamado de *quemadores con bajo nivel de exceso de aire*, que trabajan sobre el principio de que los niveles bajos de exceso de aire suprimen la formación de NO_x .

2. La combustión por etapas para bajar las temperaturas punta, ya que la formación y concentración de óxidos de nitrógeno están influenciadas principalmente por la composición del combustible (NO_x combustible), diseño del quemador, y caja de llamas o temperatura de la llama y tiempo de residencia de combustión. Esto es especialmente cierto en lo que respecta a la formación de NO_x . Los quemadores por etapas constan de dos sistemas o pueden encontrarse de dos clases:
 - a) Quemador de aire por etapas que divide el aire de combustión en primario y secundario. La combustión primaria, rica en combustible, limita la temperatura punta de la llama, limitando así la formación de NO_x . El aire secundario se introduce para completar la combustión de la parte de combustible que todavía queda en la mezcla rica.
 - b) Los quemadores del combustible por etapas inyectan una parte del combustible gaseoso en el aire de combustión, y esto da como resultado una combustión muy pobre, lo que reduce también la temperatura punta de la llama, dando como resultado una formación térmica menor de NO_x . El resto del combustible es inyectado en una combustión secundaria a través de inyectores o boquillas secundarias. Los productos de la combustión de la zona primaria reducen la temperatura punta y la concentración de oxígeno de la zona secundaria, inhibiendo así la formación de NO_x .
3. La recirculación de los gases de la combustión extrae una parte de los gases de combustión que van a la chimenea y los retoma al quemador con el aire de combustión, lo que da como resultado una temperatura punta menor de la llama, que reduce la formación térmica del NO_x .
4. El agua o inyección de vapor con las mezclas aire-combustible se utiliza con los quemadores de turbina para limitar la temperatura de la llama, reduciendo así la formación de NO_x .
5. Los métodos de poscombustión, que incluyen métodos de reducción selectiva catalítica y no catalítica y tratamiento por vía húmeda (*scrubbing*) de los gases de combustión.
 - a) En el proceso de reducción catalítica selectiva, se inyecta amoníaco en la corriente aguas arriba de los gases de combustión de un lecho catalítico, que puede ser titanio, vanadio, platino, zeolitas y cerámica conformada en placas de nido de abeja, anillos o *pellets*. Una reacción química convierte el NO_x y NH_3 (amoníaco) en una sal amónica que se descompone para formar nitrógeno elemental y agua que se descarga a la chimenea.
 - b) En el proceso de reducción catalítica no selectiva, se inyecta amoníaco o urea en una situación o lugar favorable térmicamente, y esto da como resultado la reducción de NO_x a N_2 y H_2O .

Combustión del carbón

El carbón es una gran fuente de energía tanto en los Estados Unidos como en Europa, y lo más probable es que continuará siendo así por muchos años. Sin embargo, uno

de los problemas con el carbón como forma de energía es su contenido de azufre, presente en su mayoría como sulfuro de hierro (azufre en forma de pirita) y en los sistemas orgánicos del carbono, algunos de ellos conteniendo el anillo tiofénico.

La *calidad del carbón* es una consideración importante cuando se quema este abundante combustible. A causa de la amplia variedad de carbones (antracita, carbón bituminoso, semibituminoso), la calidad del carbón puede afectar a la tasa de combustión, capacidad de la caldera, consumo específico, tasa de ensuciamiento y depósito de escorias de las superficies de transferencia térmica, corrosión y erosión por cenizas volantes desde el lado del hogar, impacto ambiental y tipo de equipo de combustión requerido, por citar algunos elementos.

Sobre la combustión del carbón mineral, se emiten a la atmósfera gases peligrosos que contienen azufre y cenizas de efectos perjudiciales sobre la vida animal y vegetal. Para hacer la combustión del carbón ambientalmente segura y aceptable, debe aplicarse algún método de desulfuración. El lavado de los gases de combustión se utiliza en muchas ocasiones, pero sólo es económico para grandes industrias y centrales térmicas. La combustión en lecho fluido está siendo aplicada también para controlar las emisiones.

La limpieza (lavado) del carbón, y especialmente la desulfuración anterior a la combustión es otra alternativa. Muchos controles de polución y mucha monitorización puede evitarse si hay disponible carbón desulfurado para plantas que llevan a cabo operaciones relativamente pequeñas.

El carbón de antracita es muy duro, no es coquizable y tiene un porcentaje de carbono fijo elevado. Arde suavemente, a no ser que la temperatura del hogar sea elevada, y requiere un tiro fuerte. El poder calorífico está alrededor de 14.000 BTU/lb (7.771 kcal/kg). El carbón bituminoso es blando, tiene un porcentaje de materias volátiles elevado, arde con una llama amarilla y fumosa y tiene un poder calorífico de 11.000 a 14.000 BTU/lb (6.100 a 7.770 kcal/kg). El carbón semibituminoso es de mayor grado de bituminosidad. Arde con poco humo; es más blando que la antracita y tiene tendencia a desmenuzarse en trozos pequeños cuando se manipula. Su poder calorífico es de 13.000 a 14.500 BTU/lb (7.216 hasta 8.048 kcal/kg). El carbón sub-bituminoso (lignito negro) es un grado inferior del carbón bituminoso con un poder calorífico situado entre 9.000 y 11.000 BTU/lb (5.000 y 6.100 kcal/kg). El lignito está entre la turba y los carbones sub-bituminosos, con una estructura de madera y apariencia caliza. El poder calorífico está situado entre 7.000 y 11.000 BTU/lb (3.885 y 6.100 kcal/kg).

Los *finos* del carbón son un producto de rechazo o desecho en las operaciones de minería y tiene menos de 3.000 BTU/lb (1.700 kcal/kg) de valor energético, con un elevado contenido de cenizas. La consecución de la combustión en lecho fluidizado circulante y el aumento de los generadores eléctricos independientes bajo la normativa PURPA (Acta Reguladora de Política Pública de Centrales) ha animado el consumo de este combustible marginal y anteriormente ignorado. Se precisa una preparación a medida especial del combustible, ya que se generan grandes cantidades de cenizas y desechos por el elevado contenido en cenizas de este combustible (hasta un 70 por 100).

Análisis del carbón. Los dos métodos de análisis del calor son el *análisis final* y el *análisis aproximado*. El análisis final da los porcentajes de los diversos elementos

químicos de los cuales se compone el carbón. El análisis aproximado determina los porcentajes de humedad, materias volátiles, carbono fijo y cenizas con un grado de aproximación elevado.

Este análisis requiere un laboratorio y un químico cualificado. Si se separa una muestra de carbón en sus componentes elementales se hallará una cierta proporción de oxígeno, hidrógeno, carbono, etc. Estos elementos se expresan generalmente como porcentajes del peso de la muestra original, siendo la unidad en peso el 100 por 100. El poder calorífico del carbón se estima del análisis final al obtener los porcentajes de carbono, oxígeno, hidrógeno y azufre en el carbón y por medida del calor de combustión despedido por una libra (kilogramo) de carbón.

Otras condiciones clasificadas en un análisis de carbones son: 1) tal como se recibe; 2) secado al aire; 3) libre de humedad; 4) libre de cenizas y humedad; 5) libre de humedad y minerales.

Como consecuencia de la gran cantidad de carbones y del gran espectro de propiedades comparado con el gas natural y combustibles líquidos, el diseño del quemador y del hogar para quemar carbón variarán bastante. Además debe considerarse el acarreo o transporte y manipulación del carbón para conducirlo hasta los quemadores, el equipo de trituración y pulverización a emplear, los métodos de eliminación de cenizas y residuos a utilizar y el tipo de control ambiental que se va a ejercer.

La Figura 11.5a muestra algunos valores medios de poder calorífico del carbón en comparación con otros combustibles. La Figura 11.5b muestra algunas propiedades típicas del carbón que deben conocerse cuando se quema carbón. La *molturabilidad* es el factor que determina la facilidad con la que el carbón puede pulverizarse, como se traduce por los números del índice ASTM, también denominado índice Hardgrove. Como número base se toma el 100; un carbón es difícil de moler si su índice está por debajo de 100, mientras que es más fácil si está por encima de 100.

Gasificación del carbón. La gasificación de carbón, el ciclo combinado y la combustión del carbón en lecho fluidizado y presurizado están bajo intenso desarrollo e investigación, incluyendo plantas de demostración, lo que promocionará el uso del carbón en el futuro. Véase la Figura 11.6a de la página 424 para un esquema del sistema de ciclo combinado integrado de gasificación del carbón. El combustible gaseoso se genera en un gasificador del carbón reaccionando con el vapor, aire y caliza, como se observa. El gas combustible presurizado se limpia al pasar a través de un separador de partículas del gas caliente, como se muestra en la Figura 11.6b. El gas de carbón limpio se suministra después al combustor de una turbina de gas, cuyos gases de escape van a parar a una caldera de recuperación productora de vapor que a su vez alimenta a un grupo de turbinas de vapor. El sistema muestra cómo se utiliza el método de limpieza de los gases calientes para poder hacer compatibles éstos con las necesidades de la turbina de gas. La operación de limpieza en caliente a presión elevada reduce el volumen de los gases que se procesan. Los problemas técnicos que se estudian son los efectos de los sistemas de gasificación del carbón sobre los álabes de la turbina, que requieren un gas libre de partículas para evitar: 1) la acumulación de depósitos sobre los mismos; 2) la erosión de los álabes por la elevada velocidad de las partículas; y 3) la corrosión de los álabes por rotura y desprendimiento de los revestimientos de los álabes. La investigación y desarrollo, apoyados por la acción gubernamental, han dado como resultado muchos conceptos

Combustible	H = BTU/lb
Carbón semibituminoso	14.500
Antracita	13.700
Finos	12.500
Coque	13.500
Madera dura o blanda, secada al horno	7.700
Madera dura o blanda, secada al aire	6.200
Raspaduras de madera	6.400
Turba secada al aire, 25% de humedad	7.500
Lignito	10.000
Queroseno	20.000
Crudo de petróleo, Pensilvania	20.700
Crudo de petróleo, Texas	18.500

H = BTU/ft ³	
Gas natural	960
Gas de alto horno	100
Gas de refinería	150
Gas de agua descarburada	290

(a)

Tipo de carbón	Fuente	Poder calorífico, BTU libra	Análisis aproximado como recibido				Análisis final, porcentaje seco y sin cenizas					Molturabilidad, ASTM
			Humedad	Porcentaje de volátiles		Cenizas	S	C	H ₂	O ₂	N ₂	
Antracita	Pensilvania	13.000	2	6,3	79,7	12	0,6	93,5	2,6	2,3	0,9	25
Bituminoso	Pensilvania	13.600	3	23,1	63,9	10	2,17	87,6	5,2	3,3	1,4	95
Bituminoso	Ohio	12.450	6	34,8	49,2	10	2,44	82,2	3,5	7,7	1,7	66
Sub-bitumin.	Colorado	9.200	24	30,2	40,8	5	0,36	75	5,1	17,9	1,5	58
Lignito	Dakota del Norte	6.330	40	27,6	23,4	9	1,42	72,4	4,7	18,6	1,5	—

(b)

Figura 11.5. (a) Algunos tipos de poderes caloríficos del carbón en comparación con otros combustibles. (b) Propiedades típicas del carbón que son censadas al analizar el carbón combustible y quemador necesario y materiales auxiliares de caldera.

de control de partículas. El sistema de filtro mostrado en la Figura 11.6b, de la compañía Combustion Power, tiene una entrada del gas cargado de partículas que desemboca sobre un lecho, que se mueve lentamente, de materia granulada. El material del separador está revestido de material cerámico resistente a las elevadas temperaturas. Mientras que el lecho granulada se mueve hacia abajo, el gas sucio se desplaza hacia arriba atravesando el lecho de material granulada, y esto hace posible que las partículas del gas sean capturadas y retenidas por el lecho granulada. El material del lecho sucio granulada se transporta neumáticamente, se limpia y se devuelve al contenedor del filtro. El gas neumático, a su vez, se limpia en un filtro de mangas convencional de alta presión para retener el polvo reunido.

La gasificación del carbón ampliará la utilización del mismo como combustible para centrales generadoras eléctricas, una vez que los problemas inherentes sean resueltos en las plantas de demostración.

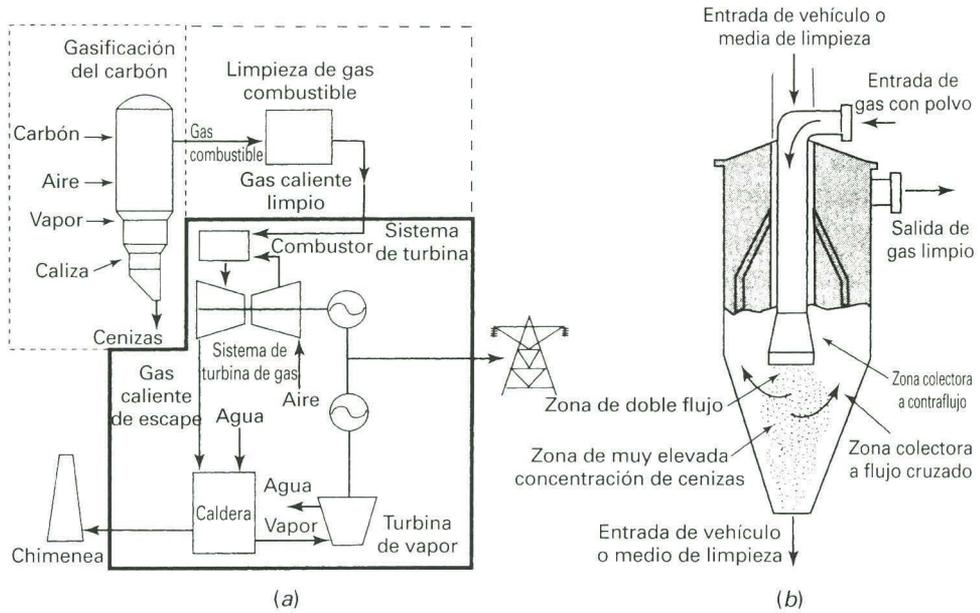


Figura 11.6. (a) Esquema de una planta de ciclo combinado de gasificación integral de carbón (IGCC), y combustión en lecho fluidizado presurizado con turbinas de gas y vapor asociadas accionando generadores eléctricos. (b) Sistema de eliminación de partículas de gases calientes, de la Combustion Power Co., que incorpora un filtro granular de lecho cerámico para limpiar el gas combustible de partículas provenientes de la unidad gasificadora de carbón. (Cortesía de *Mechanical Engineering magazine*.)

Métodos de combustión del carbón

La combustión del carbón. Ha progresado desde el acarreo manual con pala a los alimentadores automáticos y el carbón pulverizado. El combustible en suspensión se quema por medio de varios alimentadores automáticos. Existen dos clases de alimentadores: el de alimentación superior, donde el combustible se lleva al hogar por el alimentado superior, y el inferior, donde el combustible se lleva por la parte inferior del hogar. Los alimentadores superiores se clasifican además en alimentadores de proyección y alimentadores de parrilla móvil. Véase la Figura 11.7.

En el alimentador superior de proyección, el carbón en bruto se sopla o proyecta por medio de aire o vapor o paletas rotativas en suspensión o proyección por encima del lecho de combustión. En el alimentador de parrilla móvil, el combustible se añade o suministra por encima de la parrilla mediante una tolva y atravesando su compuerta, que regula el espesor de la capa o lecho de combustibles. A medida que la parrilla se mueve, el combustible hacia la parte trasera del hogar se quema y se forma el coque, de forma que cuando llega al final del hogar sólo quedan cenizas y escorias que han de eliminarse de la parrilla. Esta parrillas se mueven hacia el frente del hogar por medio de un piñón y cadenas (y motor reductor de accionamiento) para recoger

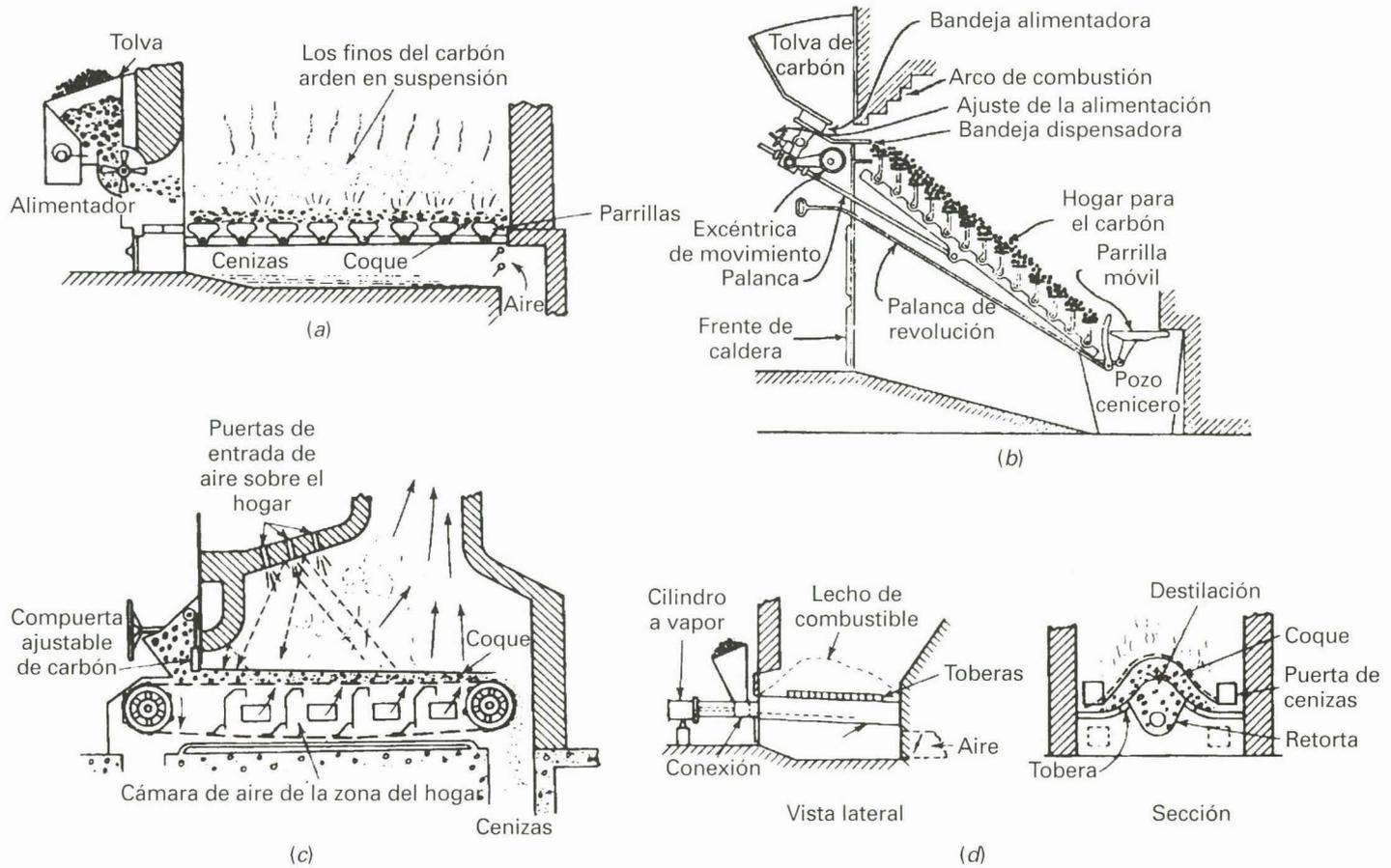


Figura 11.7. Clasificación de alimentadores de carbón. (a) Alimentado por dispersión. (b) Parrilla inclinada de alimentación superior. (c) Parrilla móvil. (d) Retorta de alimentación inferior.

una nueva carga de combustible y así mantener la marcha del ciclo. Los alimentadores de combustible del tipo inferior que se muestran en la Figura 11.7d tienen la alimentación del carbón por debajo del lecho. El combustible es empujado a lo largo de la sección de alimentación o retorta hacia el hogar y se reparte sobre el lecho de combustible por cada lado del mismo. A estos tipos de alimentadores se les designa con varios nombres. La designación de cada uno está determinada por el tipo de mecanismo utilizado para mover el carbón, como de retorta simple, retorta múltiple, tornillo alimentado o alimentación de émbolo. Las unidades de retorta única tratan hasta 50.000 lb/hr (23 ton/hr); las de retorta múltiple manejan hasta 500.000 lb/hr (230 ton/hr).

Combustión de carbón pulverizado. La combustión del carbón pulverizado es el medio más utilizado para quemar carbón en las calderas grandes. El sistema exige al carbón pasar desde tolvas de alimentación a través de alimentadores hasta el molino pulverizador. La molienda del carbón permite a los elementos combustibles del carbón una oxidación rápida (combustión) en el momento en que se alcanza la temperatura de ignición.

Además permite una combustión más completa que con la parrilla o lecho de combustión. A medida que estas partículas sólidas entran en el hogar y quedan expuestas al calor radiante, la temperatura aumenta y las materias volátiles del carbón destilan en forma de gas. Se introduce aire suficiente al quemador para mezclarse íntimamente con la corriente de partículas de carbón, y así mantener la combustión. Los volátiles arden primero, y después el calor calienta el carbón restante hasta ponerlo incandescente. El aire secundario se introduce alrededor del quemador, que suministra el oxígeno para completar la combustión de las partículas de carbón con llamas de varios metros de longitud. La Figura 11.8a y c muestra los hogares de carbón pulverizado dispuestos para sistemas de combustión de llama larga, sistemas de autocombustión y sistemas de combustión tangencial por los ángulos o vértices del hogar de la caldera.

En general, los molinos pulverizadores pueden clasificarse como de atrición o de impacto. A estos tipos habría que añadir los llamados de desgaste, que es una variante del tipo de atrición, impacto o de ambos. Los molinos de impacto generalmente tienen algo de acción de atrición. Y análogamente, mientras la atrición puede ser la acción primaria de un molido, el impacto está presente como acción secundaria. Así pues, tenemos molinos de impacto, incluyendo los de bolas y martillos, y los molinos de atrición, incluyendo los de rodillos y los de bolas y barras.

La Figura 11.9 de la página 428 muestra un molino de bolas. Los elementos de molienda constan de tres rodillos foroidales igualmente espaciados que ruedan en un anillo cóncavo de molienda. La fuerza se aplica a los rodillos desde arriba por un anillo de empuje que los carga de manera uniforme, y conecta suavemente en los extremos de los rodillos. El eje principal de accionamiento gira la mesa que soporta el anillo de molienda, que transmite el movimiento a los rodillos, accionándolos hasta aproximadamente la mitad de la velocidad del anillo de molienda. Los rodillos giran sobre su propio eje y simultáneamente de forma planetaria giran alrededor del eje del molino separados e igualmente espaciados alrededor del anillo por un separador o espaciador.

Los quemadores de carbón pulverizado deben suministrar aire y combustible al hogar de manera que permitan una ignición estable, una forma efectiva de control de

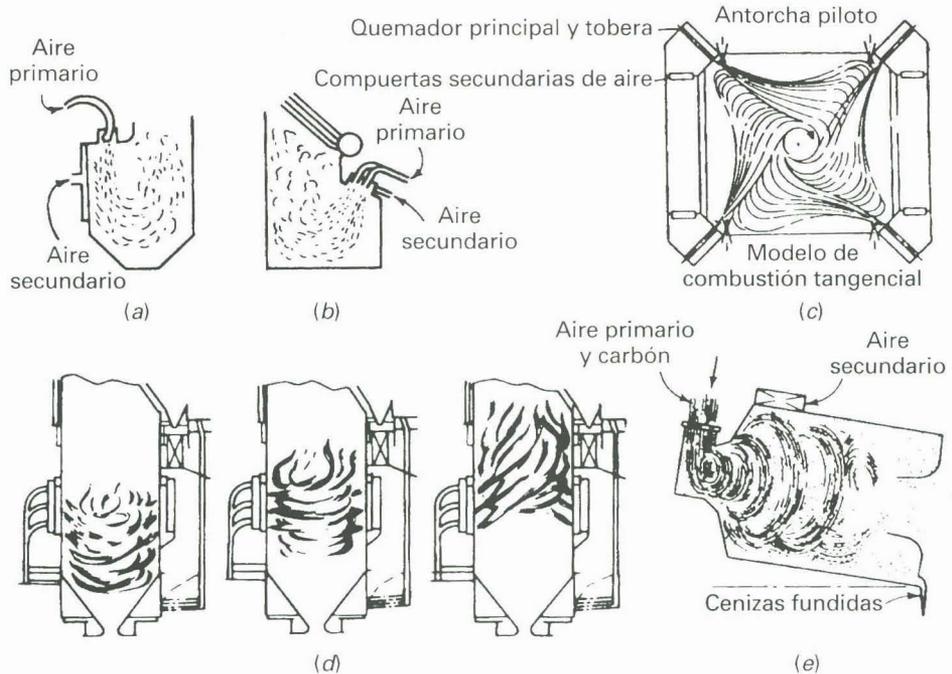


Figura 11.8. Métodos de combustión del carbón pulverizado. (a) Sistema de llama. (b) Sistema de autocombustión. (c) Combustión tangencial o de ángulo. (d) Quemador oscilante en combustión tangencial; se usa para carga variable. (e) Ciclónico, lanza el carbón y el aire contra las paredes de la tobera quemador en combustión rotacional.

llama y movimiento, a través de una mezcla completa del combustible y aire. El aire utilizado para transportar el carbón al quemador constituye el aire primario; el aire secundario debe introducirse en el quemador (aire de combustión turbulento) o alrededor o cerca del quemador (quemadores de tobera). El quemador turbulento (véase la Figura 11.10 de la página 429) imparte un movimiento de rotación a la mezcla carbono-aire en una tobera central, y el aire secundario que proviene de una cámara alrededor de esta tobera, todo ello rodeando al quemador. Esto da algo de premezcla al carbón y al aire y una turbulencia considerable. En algunos quemadores la mezcla de carbón-aire sale de una serie de toberas para mezclarse dentro del hogar con el aire secundario admitido a través de aperturas separadas. La combustión tangencial tiene los quemadores en los ángulos o esquinas del hogar que dirigen sus llamas tangencialmente a un círculo imaginario en el espacio central del hogar (Fig. 11.8c). Así puede conseguirse la turbulencia, de hecho hay una tendencia para los materiales no quemados en la cola de la llama a ser tratados por las compuertas de aire secundario. Una forma especial de combustión tangencial se muestra en la Figura 11.8d. Estos quemadores de llama ajustable en altura (verticalmente) regulan la temperatura del hogar y la salida de gases según la carga. Esto a su vez controla el sobrecalentamiento en un amplio rango de cargas. Las instalaciones más modernas utilizan un control automático de la inclinación del quemador.

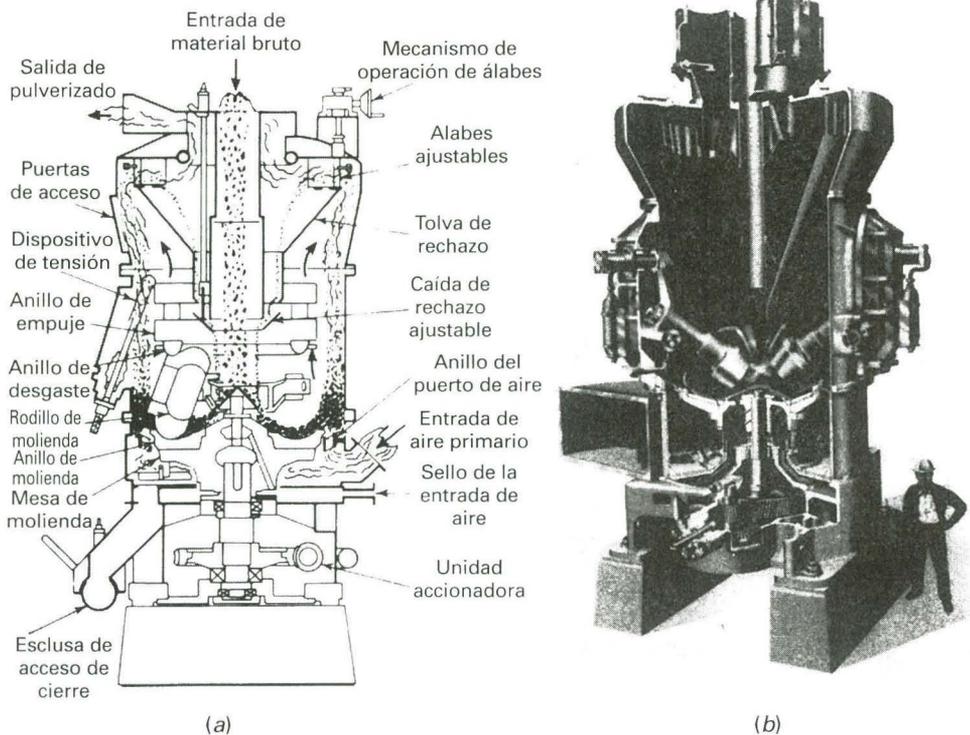


Figura 11.9. Molino de bolas pulverizador. (a) Detalle interno. (Cortesía de Foster-Wheeler Corp.) (b) Vista externa de una unidad. (Cortesía de Combustion Engineering Inc.)

El quemador ciclónico ilustrado en la Figura 11.8e recibe carbón machacado (no pulverizado) en una corriente de aire tangencial de alta velocidad, tangente al alojamiento o tobera del quemador, que forma un hogar primario refrigerado por agua. El carbón gira y se esparce por el hogar y hacia sus paredes por la fuerza centrífuga, y arrastra así la capa de revestimiento de cenizas fundidas y es lavado por el movimiento rápido torsional del aire. El aire secundario entra a velocidad elevada también, y además es paralelo al eje de la mezcla primaria de carbón-aire. El carbón en la capa pegajosa de las cenizas se quema y las arrastra. La combustión de las materias volátiles comienza en la cámara del quemador y se completa en el hogar secundario en el que descarga la cámara-quemador. Las cenizas fundidas, bajo la fuerza centrífuga, chocan contra las paredes de la cámara-quemador y la inclinación ligera induce a las escorias a descargarse de forma continuada. La naturaleza de esta combustión tiende a reducir mucho la cantidad de ceniza en suspensión y, por consiguiente, la emisión de cenizas volátiles es despreciable.

Calderas de combustión de carbón- evacuación de residuos. Las plantas de combustión de carbón deben disponer y tratar o eliminar una gran cantidad de cenizas volátiles, cenizas inferiores y sólidos de la desulfuración de gases de la combustión,

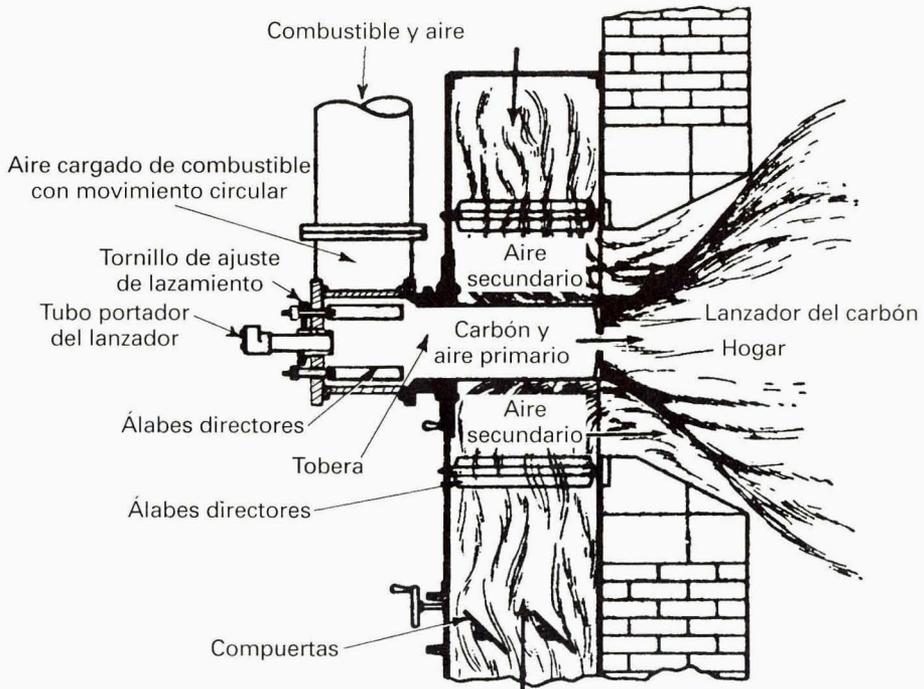


Figura 11.10. La combustión del carbón pulverizado consta de una mezcla ardiente de aire y carbón en una tobera central con aire secundario viniendo alrededor de la tobera para obtener la completa combustión del carbón pulverizado.

de forma que estos residuos sean reprocesados o usados, por ejemplo, como relleno del cemento para construcción de carreteras. Los requerimientos jurisdiccionales sobre disposición y evaluación de residuos son uno de los temas que necesitan atención en la evacuación de los desechos de la combustión del carbón. Se necesitan licencias y permisos, como mínimo, para el depósito de cenizas en lagunas o pozos. Un requisito fundamental es el efecto de cualquier vertido sobre el Clean Water Act y el Safe Drinking Water Act, normas emitidas por el gobierno de los Estados Unidos. En otras jurisdicciones, como las estatales, los pozos: 1) deben estar a distancia suficiente sobre la capa freática local; 2) deben tener condiciones de suelo y subsuelo que no sean proclives al asentamiento de estos materiales; 3) deben situarse fuera de canteras de piedra caliza, corrientes de agua, lagunas, pozos acuíferos o minas. Existen otros requisitos estatales como cabeceras de pozos que suministran agua a zonas de vegetación y graduación de pozos de forma que mantengan niveles y taludes aceptables.

Otros residuos incluyen los que provienen de la limpieza del lado del hogar como los de limpieza de los tubos, y aquellos provenientes de la limpieza del lado del agua. Estos pueden incluir residuos peligrosos a causa de la utilización de sustancias químicas en la operación de limpieza, que puede requerir diferentes vertidos según legislaciones diversas y requerimientos de evacuación distintos de los de las

Tipo de combustible	Peso específico	Densidad, API	Peso, lb/galón	Poder calorífico	
				BTU/libra	Millones BTU/barril
Combustible residual	1,0	10	8,337	18.540	6,5
N.º 4 fuel-oil	0,966	15	8,053	18.840	6,35
Destilación fuerte	0,910	24	7,587	19.190	6,1
Destilación suave	0,865	32	7,215	19.490	5,95
Queroseno	0,825	40	6,879	19.750	5,7

(a)

Densidad, API	Peso específico	Peso, lb/galón	BTU libra	BTU/galón	lb/42-gal barril	lb pie ³
3	1,0520	8,76	18.190	159.340	368,00	65,54
5	1,0366	8,63	18.290	157.840	362,62	64,59
7	1,0217	8,50	18.390	156.320	357,37	63,65
9	1,0071	8,39	18.490	155.130	352,46	62,78
11	0,9930	8,27	18.590	153.740	347,71	61,93
13	0,9792	8,16	18.690	152.510	342,88	61,07
15	0,9659	8,05	18.790	151.260	338,22	60,24
17	0,9529	7,94	18.890	149.980	333,64	59,42
19	0,9402	7,83	18.980	148.610	329,23	58,64
21	0,9279	7,73	19.060	147.330	324,91	57,87
23	0,9159	7,63	19.150	146.110	320,71	57,12
25	0,9042	7,53	19.230	144.800	316,59	56,39
27	0,8927	7,44	19.310	143.670	312,60	55,68
29	0,8816	7,35	19.380	142.440	308,70	54,98
31	0,8708	7,26	19.450	141.210	304,92	54,31
33	0,8602	7,17	19.520	139.960	301,18	53,64
35	0,8498	7,08	19.590	138.690	297,57	53,00
37	0,8398	7,00	19.650	137.550	294,04	52,37
39	0,8299	6,92	19.720	136.400	290,64	51,76
41	0,8203	6,83	19.780	135.090	287,23	51,16

(b)

Figura 11.11. (a) Fracciones típicas de combustibles petrolíferos. (b) Propiedades de aceites combustibles dispuestos según escala de densidad API normal a 60 °C.

cenizas volátiles. Es, pues, esencial en la operación de calderas ser cuidadoso con estas reglamentaciones sobre evacuación de residuos.

ACEITES COMBUSTIBLES (GASOIL Y FUEL-OIL)

Los combustibles líquidos derivados del petróleo difieren del gas, con viscosidades muy diferentes. Al quemar un gas, la mezcla íntima con el aire puede alcanzarse y

así tendrá lugar la combustión completa mientras no exista falta de aire en el proceso de combustión. Los fuel-oil son viscosos; además es necesario romper y pulverizar el fuel-oil por atomización de forma que el aire pueda combinarse con las finas gotitas de aceite. Sin embargo, la naturaleza viscosa del aceite nunca permite a éste alcanzar la naturaleza gaseosa; además la temperatura que puede alcanzarse en la combustión es menor que la que puede esperarse en comparación al desprendimiento instantáneo de calor de cuando se quema un gas. La llama del fuel-oil o gas-oil es mucho más larga desde la tobera u orificio de salida del quemador. Se han desarrollado equipos de atomización óptimos que dispersan el fuel convenientemente, quemándose así más rápidamente, lo que produce temperaturas de llama más elevada. Los productos petrolíferos se listan en la Figura 11.11a y b. El refinado de petróleo implica separar y recombinar las moléculas de carbono e hidrógeno en fracciones que tienen el mismo rango de puntos de ebullición. Las fracciones típicas desde ligeros hasta pesados son: nafta, gasolina, queroseno y gas-oil.

La escala API es una escala del American Petroleum Institute para mostrar la gravedad específica. La escala API fija una lectura de 10 °F como igual a la gravedad específica de 1.0. Lecturas mayores de 10 °F indican una gravedad específica menor de 1.0, o sea, un aceite más ligero. Para obtener la gravedad específica o peso específico real en relación al agua a partir de la lectura API, utilice la ecuación siguiente:

$$\text{Gravedad específica real} = \frac{141.5}{131.5 + \text{grados API}}$$

La gravedad o peso específico en grados Baumé (Be) se halla del mismo modo, excepto que los números son 140 y 130, respectivamente. A efectos prácticos, las dos escalas de gravedad específica pueden considerarse la misma. Los fuel-oil se venden en seis grados normalizados bajo los números de 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Los grados 1, 2 y 3 son fuel ligeros, medio y pesado del fuel-oil doméstico (gas-oil). Éstos normalmente no precisan calentamiento previo a su combustión. Los grados 4, 5 y 6 corresponden a especificaciones de los tipos A, B y C, respectivamente. Estos fuel son pesados y viscosos, así que requieren calentamiento previo antes de la pulverización en el hogar.

La *viscosidad* es la dificultad o facilidad relativa con la que estos aceites fluyen. Se mide por el tiempo en segundos que una cantidad normalizada de aceite se toma o invierte para fluir a través de un orificio estándar en un dispositivo llamado *viscosímetro*. El normal estándar en Estados Unidos es el Saybolt Universal, o el Saybolt Furol para aceites de elevada viscosidad. Como la viscosidad cambia con la temperatura, las pruebas deben hacerse a temperatura normalizada, normalmente 100 °F (37.7 °C) para el Saybolt Universal y 122 °F (50 °C) para el Saybolt Furol. La viscosidad indica cómo se comporta el aceite cuando es bombeado y, más particularmente, muestra cuándo se necesita el precalentamiento y qué temperatura debe adquirir.

La Figura 11.12 de la página siguiente es un gráfico que puede utilizarse para determinar la mejor viscosidad y temperatura para quemar eficientemente un aceite (por ejemplo pesado) con una temperatura y viscosidad cortas. Esta tabla ayuda para determinar a qué temperatura debe calentarse un aceite viscoso antes de su combustión. La tabla incorpora instrucciones.

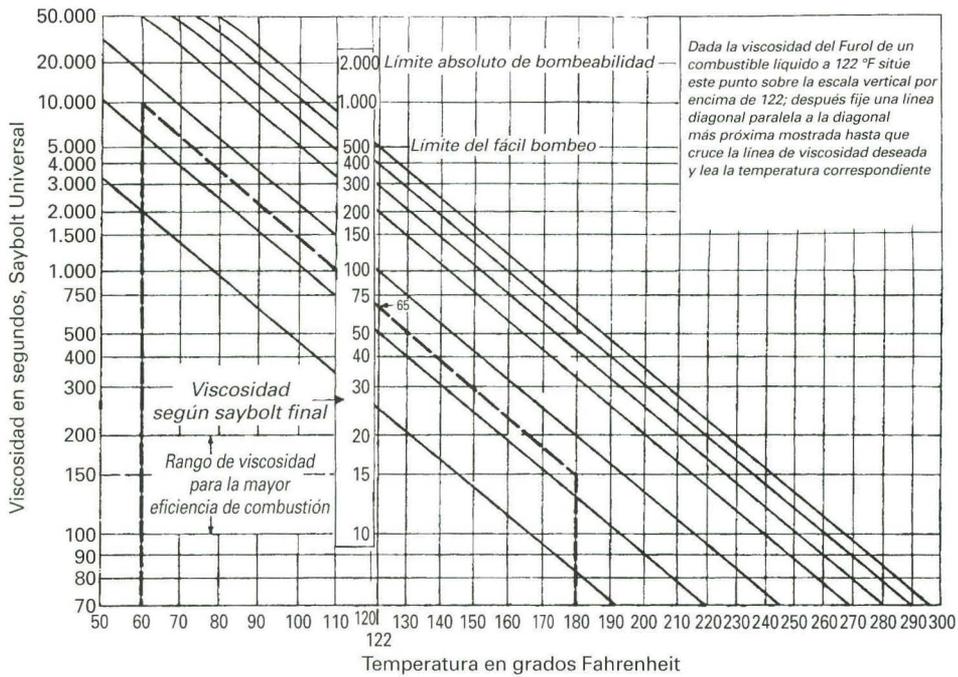


Figura 11.12. Gráfico que muestra a qué temperatura un combustible líquido con una cierta viscosidad y temperatura debe ser calentado para obtener la mayor eficiencia de combustión.

El *punto de inflamación (flash point)* representa la temperatura a la cual un aceite da suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con el aire. El resultado de una prueba de punto de inflamación depende del aparato, de forma que ha de especificarse, así como su temperatura. El punto de inflamación mide la volatilidad de un aceite e indica la temperatura máxima para un manejo seguro.

El *punto de goteo (pour point)* representa la temperatura más baja a la cual un aceite fluye, en condiciones normalizadas. Incluyendo el punto de goteo como una especificación se asegura que un aceite no dará problemas en su manipulación a temperaturas bajas. Centrifugando una muestra de aceite pueden determinarse las cantidades de agua y sedimentos presentes. Éstas son impurezas incombustibles, y mientras no sea económico eliminarlas, no deberían presentarse en cantidades excesivas (no más del 2 por 100). Las impurezas incombustibles en los aceites combustibles derivados del petróleo son bien sales naturales, bien productos químicos procedentes de las operaciones de refinó, o bien de oxidaciones o impurezas del transporte, y se muestran o presentan como cenizas. Algunas cenizas producto de las impurezas causan un desgaste rápido de los refractarios, y algunas son abrasivas para las bombas, válvulas y piezas de los quemadores. En el hogar pueden formar revestimiento de escoria vitrificada.

La temperatura requerida en el quemador para los fuel de números 4, 5 y 6 es, generalmente, de unos 10 °F (12 °C) por debajo del punto de inflamación; o sea, para el fuel número 4, 150 °F (65 °C); para el fuel número 5, 175 °F (80 °C); y para el fuel de número 6, 275 °F (135 °C).

QUEMADORES DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS (ACEITES DERIVADOS DEL PETRÓLEO)

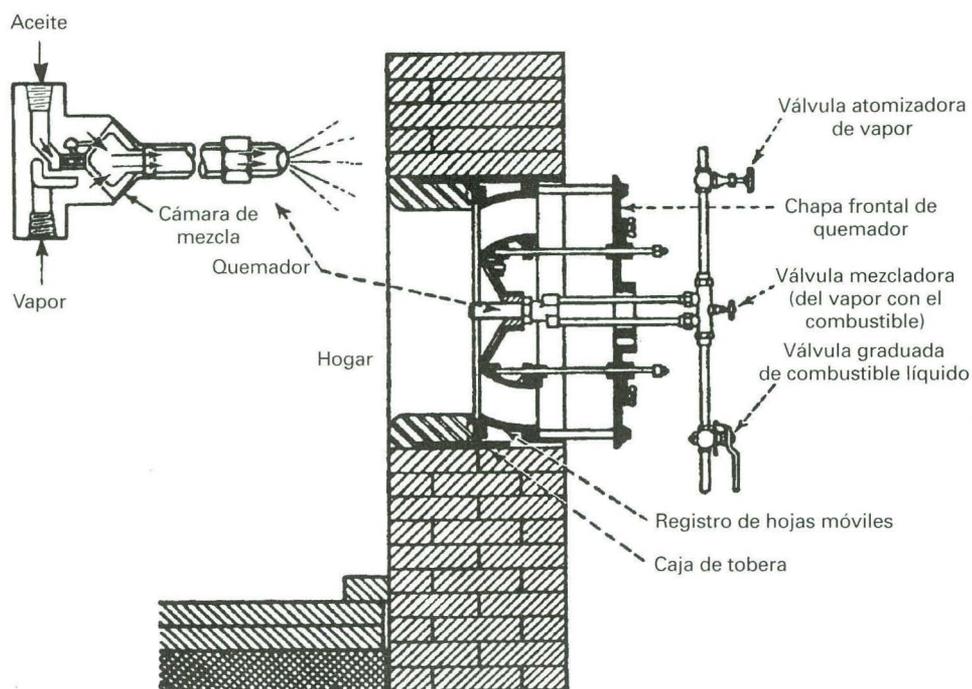
Además de proporcionar combustible con aire y mezclarlo, los quemadores deben preparar el fuel-oil (y/o gas-oil) para la combustión. Los dos sistemas (con muchas variantes) son: 1) el combustible debe vaporizarse o gasificarse por calentamiento en el quemador, o 2) el aceite combustible debe atomizarse por el quemador de modo que la vaporización pueda tener lugar en la cámara de combustión. Los quemadores de vaporización (primer grupo) están limitados en su rango a combustibles que puedan ser manipulados manualmente, y por ello tienen poca utilización en plantas industriales. Si el combustible tiene que vaporizarse en el espacio de combustión y en el instante del tiempo disponible, debe dividirse en muchas pequeñas partículas para exponer la mayor superficie posible al calor (y al oxígeno del aire). Esta atomización se efectúa de tres formas básicas: 1) utilizando vapor o aire comprimido para romper el aceite en gotitas o *droplets*; 2) forzando el aceite a pasar a presión a través de un orificio, y 3) desprendiéndola de una película de aceite por centrifugado (fuerza centrífuga rotativa). Los tres sistemas se utilizan en la realidad. Además, un quemador debe suministrar una buena mezcla de combustible y aire para que pueda garantizarse una completa combustión de las gotitas.

Los quemadores de atomización por vapor tienen la capacidad de quemar casi cualquier fuel-oil, o de cualquier viscosidad, a casi cualquier temperatura. El aire se usa menos como medio de atomización porque su coste operativo puede ser elevado. Estos quemadores pueden clasificarse en dos tipos según sus sistemas:

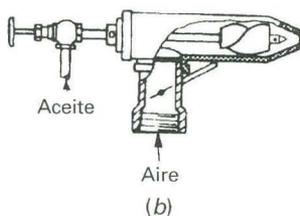
1. Mezcla interna o premezcla del combustible y vapor o aire, como se muestra en la Figura 11.13a para vapor y la Figura 11.13b para aire. La mezcla se realiza en el interior del cuerpo o cabeza del quemador, antes de ser proyectada a presión adentro del horno (hogar).
2. Mezcla externa, cuando todo el combustible emergente del quemador se cruza y es captado por el chorro de vapor o aire (Fig. 11.13c).

La Figura 11.13d muestra un registro de aire que controla la cantidad de aire de combustión que rodeará al combustible proyectado al hogar. El consumo de vapor de atomización ronda del 1 al 5 por 100 del vapor producido, con una media del 2 por 100 aproximadamente. La presión necesaria varía entre 75 y 150 psi (5,2 y 10,5 bar).

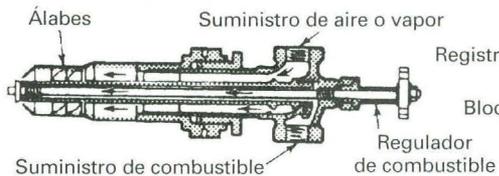
En el quemador de la Figura 11.13c, el aceite combustible alcanza la salida a través de un paso central, con el caudal regulado por un tornillo regulable. El aceite gira contra una placa-pastilla para incidir en ángulo recto contra la corriente de vapor o aire, saliendo junto a él. La corriente de atomización rodea la cámara del aceite (combustible) y recibe un movimiento de giro o rotación de los álabes o pasos por los que atraviesa en su camino. Cuando se usa aire para atomizar, deberá estar a 10 psi (0,7 bar) para aceite ligero y a 20 psi (1,4 bar) para los más pesados. El aire de combustión entra a través de un registro (Fig. 11.13d). Los álabes o compuertas (paletas) son ajustables para poder controlar el exceso de aire.



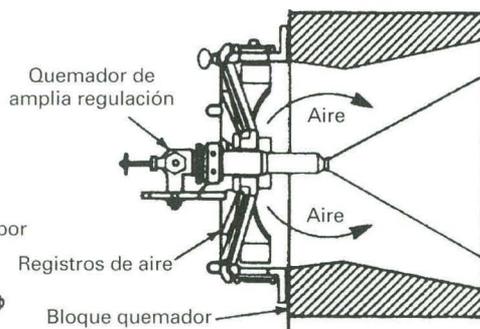
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11.13. Quemadores de aceite combustible de pulverización por aire y vapor. (a) Los quemadores de atomización por vapor mezclan el aire y el vapor interiormente. (b) Los quemadores de atomización por aire también mezclan el aceite y el aire. (c) Quemadores que mezclan aire o vapor con aceite externamente. (d) Registros de control de aire alrededor del quemador.

Atomizadores mecánicos. Los quemadores de atomización mecánica dependen de la alta presión de aceite producida por una bomba para forzar a éste a través de las boquillas (con pastillas atomizadoras) a producir una niebla fina para una combustión más completa en el hogar.

Una atomización buena se produce cuando el aceite a una presión de 75 a 200 psi (5,25 a 14 kg/cm²), se descarga a través de un pequeño orificio, a menudo ayudado por una pastilla o disco estriada o con canales o isletas. El disco da al aceite un movimiento rotativo antes de que pase a través de un orificio taladrado en una placa-orificio o pastilla-tobera, donde tiene lugar la atomización. Para un orificio determinado (de décimas de milímetro) la atomización depende de la presión, y como la presión y el caudal están relacionados, la mejor atomización tiene lugar para un rango limitado de capacidades del quemador. Para poder adecuar la carga de caldera con la demanda de vapor cuando ésta aumenta, deben instalarse un número de quemadores y conectarse o desconectarse para ello, o bien deben utilizarse diferentes *gliceurs* o pasos-orificio. Todas las placas-pastilla o toberas de orificio deben canalizarse al mismo diámetro o tamaño en un sistema dado, nunca calentar con diámetros de orificio distintos y mezclados.

Hay muchos diseños de quemador para extender el rango usual de 1,4:1 de capacidades de la tobera o *glicieur* de atomización mecánica. Uno de ellos tiene un regulador que abre orificios tangenciales adicionales en la boquilla a medida que aumenta la presión de atomización. Esto da un rango o regulación de 4:1. El quemador de la Figura 11.14a utiliza una varilla cilíndrica de control central que, a través de una punta cónica fina, varía la sección tangencial de la pastilla atomizadora y el volumen de aceite que pasa por el orificio.

El amplio rango o campo del atomizador mecánico (Figura 11.14b) da un rango de regulación de cerca de 15:1 y mucho mayor si es necesario. Utilizando alternativamente una válvula o bomba de presión constante-diferencial como se muestra, la diferencia de presión entre impulsión y retorno se mantiene constante. Este sistema ofrece ventajas en muchas plantas:

1. No se retorna combustible al tanque de almacenaje o aspiración de bomba.
2. El fuel entra al circuito cerrado con el mismo caudal con que se quema, simplificando así el sistema de medida y control de combustión.
3. La bomba puede utilizarse para suministrar presión a los quemadores existentes.

El *quemador rotativo de copa* atomiza el fuel-oil literalmente dividiéndolo en gotitas finas. Una copa rotativa cónica o cilíndrica gira a elevada velocidad (normalmente a 3.500 rpm) accionada por un motor eléctrico. El aceite, moviéndose circularmente y hacia afuera por la fuerza centrífuga, alcanza el borde de la copa donde por fuerza centrífuga la película o capa delgada de combustible se desprende y choca contra el aire (Fig. 11.14c). Este tipo de atomización no requiere presión del aceite combustible más allá de la necesaria para llevarlo hasta la copa rotativa. Deben evitarse las temperaturas elevadas de precalentamiento, ya que se puede desarrollar la gasificación. La copa rotativa puede atomizar satisfactoriamente aceites de viscosidad alta (300 segundos Saybolt Universal, o SSU) y tiene un rango amplio, de cerca de 16:1.

Los dos tipos de quemadores rotativos de copa utilizados son el tipo de bomba con la bomba montada sobre el quemador y el tipo de bomba separada, es decir,

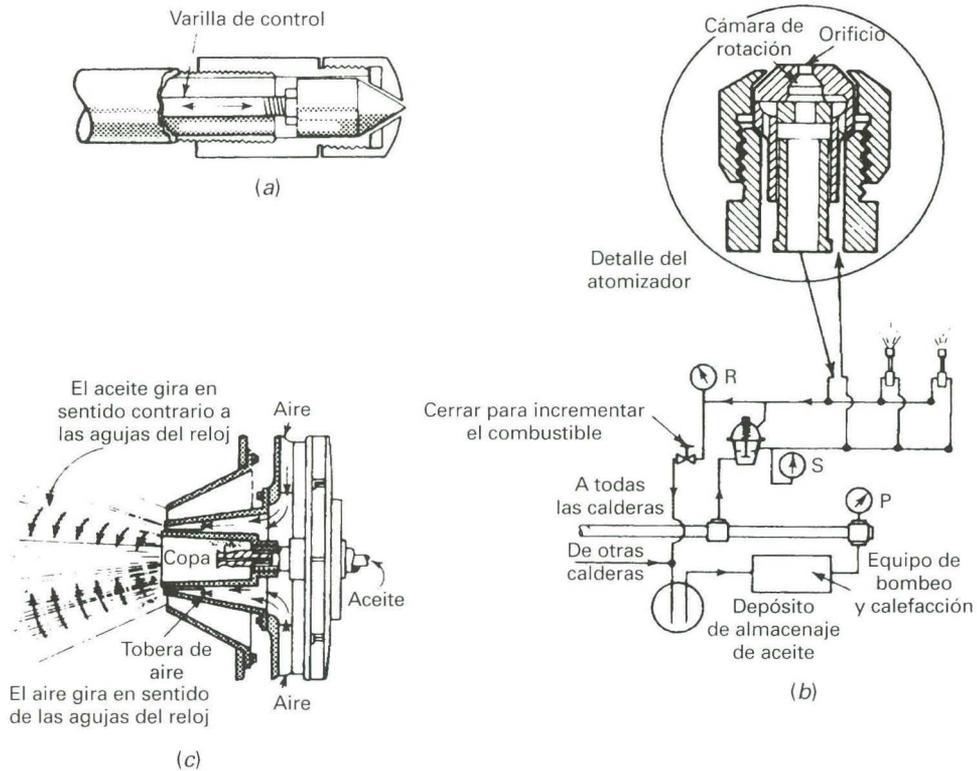


Figura 11.14. Tipos de quemador de atomización mecánica. (a) Varilla de control de nivel, varía la atomización. (b) Bomba de presión constante-diferencial o válvula de control de pulverización. (c) Quemador de copa rotatoria que atomiza combustible por fuerza centrífuga.

localizada remotamente, como en la Figura 11.14b, donde el aceite se toma del tanque de almacenamiento para bombearse directamente al quemador. Cuando se usan aceites más pesados, se precisa un precalentador antes de que el aceite llegue al quemador, para poder obtener una buena atomización. Los fuel más pesados son más difíciles de quemar para estos quemadores, y deben tener una antorcha eléctrica de encendido por chispa o incluso con gases piloto y poder tener así una llama o antorcha piloto para poder encender la llama principal; esto requiere una ignición temporizada con un período de encendido y una llama piloto de prueba.

La atomización mecánica ha dado como resultado el crecimiento y desarrollo de los quemadores de bajo exceso de aire, alcanzando la presión de atomización, midiendo cuidadosamente el combustible y el aire suplementario al quemador y la temperatura del aceite suministrado al quemador. Como puede observarse, la operación con bajo exceso de aire requiere controles y equipos especiales, un mayor ajuste de los mismos y un cuidado y mantenimiento continuo para que la relación adecuada aire/combustible sea mantenida con un bajo exceso de aire mediante el diseño del equipo necesario especial para alcanzar los resultados deseados.

Guía de operación con quemadores de combustible líquido. Deben observarse algunas precauciones en la operación con los quemadores y su mantenimiento, incluyendo lo siguiente:

1. Evitar que las llamas rocen directamente o incidan sobre cualquier superficie calefactora de caldera, como colectores de agua, tubos, chapas y superficial similares de caldera para evitar recalentamiento y ampollas (efecto de soplete).
2. Las cabezas de quemadores y toberas o «chiclés» deben mantenerse limpias para conseguir una buena atomización. El aceite que va a los quemadores debe llegar a la temperatura adecuada por la misma razón, así como la presión adecuada del aceite en los quemadores de atomización mecánica.
3. Los filtros de las líneas o tuberías de aceite combustible deben limpiarse o reemplazarse periódicamente para evitar óxidos, depósitos y materiales extraños similares provenientes de los depósitos de combustible, que podrían así interrumpir el flujo de aceite a los quemadores, produciendo una llama intermitente o posiblemente un apagado de la llama. Bajo estas condiciones, si el sistema de seguridad de llama no detecta esta pérdida parcial de llama, el combustible que no ha ardido en el hogar puede producir una explosión en el hogar mismo o en el lado de fuego de la caldera.
4. Un buen mantenimiento es esencial en cualquier equipo de combustión para evitar el riesgo o azar de un incendio alrededor o cerca del quemador. La fuga de combustible debe limpiarse con prontitud y la fuente u origen de la misma debe determinarse y conocerse. No apile o acumule trapos aceitosos y otros desperdicios cerca de las líneas de combustible o quemadores.
5. Mantenga el caudal de aire apropiado para preservar la relación deseada aire-combustible, así como para evitar la polución del aire de descarga inadecuada de la chimenea, tales como humos.
6. Compruebe y revise los controles de seguridad, tales como células y equipos de seguridad de llama mediante las instrucciones pertinentes del fabricante y con la frecuencia adecuada, lo mismo que con los controles para mantener una combustión eficiente y segura en todo el equipo.
7. Es esencial mantener las entradas de aire a la caldera en buenas condiciones, especialmente en pequeñas calderas que reciben el aire de combustión del interior de la sala de calderas. También es fundamental mantener los conductos de descarga de gases de chimenea libres de fugas y obstrucciones en la sala de calderas. Además de una combustión pobre existe el riesgo de gases tóxicos tales como monóxido de carbono, un gas letal. Una norma NFPA* es tener al menos una abertura de 1 pulgada cuadrada (6,5 cm²) por cada 4.000 BTU/hr (1000 kcal/hr o 1 termia/hr) de combustible gastado, o sea:

$$\begin{aligned} \text{Abertura o superficies de entrada de aire en cm}^2 &= \frac{1000 \text{ kcal/hora}}{6,5 \text{ cm}^2} = \\ &= 155 \text{ kcal/hora/cm}^2 = 0,15532 \text{ termia/hora/cm}^2. \end{aligned}$$

* National Fire Protection Association de Estados Unidos (Asociación Nacional de Protección de Incendios).

Ejemplo. Una caldera recibe el aire de combustión de una sala de calderas cerrada y está tarada a 6.000 lb/hr (2.700 kg/hr) con un rendimiento del 78 por 100. ¿Qué tamaño de apertura se necesita para el aire de combustión?

· Utilice 1.000 BTU por libra de vapor (252 kcal por cada 0,45 kilos de vapor = 560 kcal/kg de vapor).

$$\text{Abertura necesaria en cm}^2 = 2.700 \cdot 560 \text{ kcal/hora} \frac{6,5}{0,78 \times 1.000 \text{ cm}^2} = 12600 \text{ cm}^2 = 126 \text{ dm}^2.$$

8. Purgue (ventile) siempre el hogar antes de iniciar cualquier proceso de encendido. El funcionamiento seguro de los sistemas automáticos de ignición exige un período de tiempo de purga adecuado de acuerdo al diseño de volumen del hogar y a las instrucciones del fabricante del sistema caldera-quemador.

Los *calentadores de combustible por vapor* con el aceite bombeado a alta presión exigen atención especial para evitar la contaminación del sistema de vapor-condensación. Los precalentadores de fuel-oil se necesitan para aceites pesados, viscosos, para facilitar el flujo y ayudar a la atomización. En estos calentadores el fuel-oil se bombea a través de los tubos que están rodeados por vapor y encerrados en un cilindro o carcasa de intercambiador.

La máxima presión segura de la carcasa o cilindro deberá estar decidida claramente, y deberá instalarse sobre la carcasa una válvula de seguridad para no sobrepasar esta presión en el sistema de suministro de vapor.

Deberán seguirse las especificaciones del fabricante sobre la presión máxima de combustible e instalarse una válvula de seguridad de descarga entre la bomba de combustible y la primera válvula de corte en la línea de descarga al calentador. La descarga de esta válvula de seguridad debe llevarse bajo tubería al tanque de almacenaje de combustible por limpieza. Deberá instalarse también una segunda válvula de seguridad en la salida del precalentador de combustible para cuando están cerradas todas las válvulas y la expansión del líquido presurizado por el calor puede crear una presión excesiva.

El condensado del calentador debería drenarse al desagüe a no ser que se emplee un visor de vidrio bien iluminado y sea observado con frecuencia, situándolo cerca del purgador de salida; o bien se puede utilizar otro medio de detección de fugas de aceite. Uno nunca puede ser demasiado cuidadoso con estas instalaciones en cuanto a vigilancia y cuidado de que algún tubo, en particular en el calentador de aceite, permitiesen pasar aceite al sistema de alimentación de agua, pasando y flotando en el agua del interior de las calderas, ya que estos combustibles constituyen una condición extremadamente nociva y peligrosa.

Gases combustibles

El gas natural es el principal combustible utilizado en generación de vapor, ya que los gases manufacturados son de coste muy elevado. Los gases subproducto normalmente tienen bajo poder calorífico y se producen en menores cantidades, de forma que normalmente se utilizan en los puntos de producción y no se distribuyen. El gas natural es incoloro e inodoro. La composición varía según la fuente y origen, pero

el metano (CH_4) es siempre el principal componente. La mayoría del gas natural contiene algo de etano (C_2H_6) y una pequeña cantidad de nitrógeno. El gas de algunas zonas, a menudo llamado *gas de pozo*, contiene sulfuro de hidrógeno y vapores orgánicos de azufre. El poder calorífico medio ronda los 1.000 BTU/ft^3 (9.333 kcal/m^3), o lo que es lo mismo, 20.000 BTU/lb (11.200 kcal/kg), pero puede ser mucho mayor (12.900 - 13.000 kcal/kg). El gas natural se vende por pies cúbicos (m^3), pero también puede venderse por termias (100.000 BTU o 1.000 kcal).

El *gas de carbón* (hulla) y el *gas de hornos de coque* (gases manufacturados) se producen carbonizando los carbones bituminosos de gran cantidad de volátiles en retortas que excluyen el aire y son calentadas exteriormente por gas de producción. Normalmente resultan además una variedad de subproductos. Limpios de impurezas, estos gases son aproximadamente una mitad hidrógeno y una tercera parte metano, más pequeñas cantidades de monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y gases iluminantes (C_2H_4 y C_6H_6). El poder calorífico ronda los 550 BTU/ft^3 (5.100 kcal/m^3).

El gas ciudad que se sirve en una zona puede ser una mezcla de dos o más gases, o bien una mezcla de gas natural y gases manufacturados. El poder calorífico normalmente alcanza de 525 a 550 BTU/ft^3 (4.900 a 5.200 kcal/m^3) y se fija por una ordenanza municipal o estatal.

El butano y el propano comercial son básicamente subproductos de la fabricación de gasolina natural y de ciertas operaciones de refinería. Se suministra propano (C_3H_8) esencialmente puro, mientras que el butano (C_4H_{10}) normalmente contiene una pequeña cantidad de propano. Ambos tienen elevados poderes caloríficos, son fácilmente licuefactables a baja presión y se utilizan ampliamente como combustibles envasados.

El *gas de alto horno* es un subproducto de la elaboración del acero; tiene el más bajo poder calorífico de cualquier gas comercial, cerca de 90 BTU/ft^3 (1.000 kcal/m^3). Es aproximadamente tres cuartas partes de nitrógeno y dióxido de carbono, siendo el único combustible importante el monóxido de carbono. El gas bruto, que normalmente contiene una concentración elevada de impurezas sólidas, se lava normalmente antes de usarse. Pero el gas sin lavar se ha quemado con éxito en hogares de calderas.

El *biogas de lodos de depuradoras* contiene alrededor de dos tercios de metano y un tercio de dióxido de carbono con pequeñas cantidades de hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno (SH_2). El poder calorífico está cerca de los 650 BTU/ft^3 (6.000 kcal/m^3). Aunque es más utilizado en motores de combustión interna, también se utiliza como gas combustible. Véase la Figura 11.15a de la página siguiente para propiedades de gases combustibles, y la Figura 11.15b para ver las propiedades de combustibles residuales.

Quemadores de gas

La combustión del gas no precisa preparación del combustible, como lo necesitan los sólidos y líquidos. Pero su proporción en el aire, mezclado y en combustión puede tratarse de varios modos. También necesitan conocerse las características del combustible para una selección de los equipos y de su operación con éxito. Los quemadores atmosféricos se utilizan para quemar gas y difieren principalmente en el

Combustible	Fuente	Composición media	Poder calorífico superior BTU ft ³	Notas
Gas de alto horno.	Subproducto de la fabricación.	58% N ₂ , 27% CO, 12% CO ₂ , 2% H ₂ , algo de CH ₄	90-100	Buen combustible cuando está limpio; se usa adecuadamente en la fuente.
Butano.	Subproducto de fabricación de gasolina, en gas de pozo.	C ₄ H ₁₀ (normalmente tiene algo de butileno, C ₄ H ₈ , y propano, C ₃ H ₈)	3.200-3.260	Licúa bajo ligera presión y se vende líquido (botella a presión).
Gas principal de horno.	Pozos petrolíferos.	Varia, sobre todo butano y propano.	1.200-2.000	Utilizado fundamentalmente en campos petrolíferos.
Gas de agua carburado.	Manufacturado del carbón enriquecido en aceite vaporizado.	34% H ₂ , 32% CO, 16% CH ₄ , 7% N ₂ , 5% C ₂ H ₄ , 4% CO ₂ , 2% C ₄ H ₆	500-600	Buen combustible pero normalmente caro. Parte de la mayoría de los gases municipales.
Gas de horno de Coque.	Subproducto de hornos de Coque.	48% H ₂ , 32% CH ₄ , 8% N ₂ , 6% CO, 3% C ₂ H ₄ , 2% CO ₂ , 1% O ₂	500-600	Buen combustible cuando se purifica; a menudo usado como fuente.
Propano.	Subproducto de gasolina.	Varia, sobre todo CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈	950-1.150	Combustible ideal para tubería hasta su punto de utilización.
Gas de refinería.	Subproducto del procesamiento de petróleo.	54% H ₂ , 27% CH ₄ , 10% CO, 3% N ₂ , 3% CO ₂ , 3% C ₂ H ₄	500-550	Usado en la costa Oeste de EE. UU., a menudo mezclado con gas de hornos de Coque.
Gas natural.	Pozos de gas.	51% N ₂ , 25% CO, 16% H ₂ , 6% CO ₂ , 2% CH ₄	135-165	Requiere limpieza.
Gas de petróleo.	Manufacturado del petróleo.	C ₃ H ₈	2.500	Parecido al butano.
Gas de producción (refinería).	Manufacturado del carbón de Coque o madera.	Varia, sobre todo butano y propano.	1.200-2.000	Usado principalmente en refinerías
Gas residual.	Planta de gas residual.	65% CH ₄ , 30% CO ₂ , 2% H ₂ , 3% N ₂ , trazas de O ₂ , CO, H ₂ S	600-700	Muchas plantas depuradoras cubren sus necesidades energéticas con este combustible.

(a)

Residuos	Poderes caloríficos medios (al ser quemados), BTU lb
Gases	
Gas de horno de Coque	19.700
Gas de alto horno	1.139
Monóxido de carbono	575
Refinería	21.800
Líquidos	
Lodos industriales	3.700-4.200
Licor negro	4.400
Licor de sulfito	4.200
Disolventes sucios	10.000-16.000
Lubricantes usados	10.000-14.000
Pinturas y resinas	6.000-10.000
Acete residual y residuos sólidos	18.000
Sólidos	
Bagazo	3.600-6.500
Cortezas	4.500-5.200
Residuos generales de madera	4.500-6.500
Serrín y virutas	4.500-7.500
Restos de café	4.900-6.500
Cáscaras de nuez	7.700
Cáscaras de arroz	5.200-6.500
Restos de maíz	8.000-8.300

(b)

Figura 11.15. (a) Propiedades de gases combustibles. (b) Poderes caloríficos de combustibles residuales.

modo en que se mezclan el aire y el combustible. El quemador atmosférico es popular, como se aprecia en sus aplicaciones domésticas. El momento cinético de la corriente gaseosa de entrada a baja presión se usa para aspirar parte del aire necesario para la combustión. Un cierre o mecanismo similar regula la cantidad de aire inducido de esta manera. El gas y el aire pasan juntos a través de un tubo que conduce a la abertura del quemador, mezclándose en el proceso. La mezcla arde en las puertas o aberturas del cabezal del quemador (con una llama azul, no luminosa). El aire secundario se dirige a la llama desde la atmósfera circundante.

En la Figura 11.16a de la página siguiente se muestra un quemador atmosférico de una sola abertura o puerta. Una válvula de aguja controla el flujo de gas través de la tobera corta; el aire es arrastrado alrededor de la puerta hacia el final. Con el tipo de quemador de puerta y forma definida, la naturaleza de la combustión depende en gran medida de la cantidad de aire primario o de premezcla. Con premezcla baja, la llama es larga y de pálido color azul. Puede tener un tono amarillo, indicador de *cracking* y presencia de carbono libre.

La operación es normalmente satisfactoria con un 30 al 70 por 100 de premezcla; en algunos diseños especiales se usa un 100 por 100 de aire primario. Este rango de premezcla da una regulación o capacidad de cerca de 4:1. Normalmente los rangos de capacidad y premezcla están estrechamente relacionados y cercanos. El aire secundario puede ser dirigido alrededor del quemador, dependiendo de la cantidad del área o sección de la abertura y del tiro. El quemador de alta presión utiliza el gas a cerca de 20 a 30 psi (1,4 kg/cm² a 2,1 kg/cm²) y el aire a la presión atmosférica o cerca de ella. Otros tipos de quemadores utilizan aire comprimido, con gas a la presión atmosférica.

Un quemador de gas de tobera refractario se ve en la Figura 11.16b. El arrastrar todo el aire de combustión depende del tiro natural o del ventilador; de aquí que las condiciones del tiro sean importantes. Un diseño utiliza múltiples chorros de gas, que descargan en la corriente de aire para producir una agitación violenta en un tubo corto de mezcla o túnel en refractario. En el quemador de la Figura 11.16b los álabes de turbulencia imparten un movimiento de torbellino o *swirl* al aire entrante en el túnel.

Las unidades grandes generadoras de vapor a menudo utilizan un quemador de gas de alta presión, de 2 a 25 psi (de 0,15 a 1,75 kg/cm²) de diseño en anillo toroidal de gas, o tubo centralizado de difusión o turbulento. El anillo de gas tiene un manguito anular situado entre el registro del aire y el muro del hogar que rodea a la apertura del quemador. Los orificios taladrados en este anillo lanzan el gas angularmente y a contracorriente del aire de combustión, controlado en cantidad, velocidad y rotación por unos restrictores.

La Figura 11.16c muestra un quemador del tipo de baja presión en el que el gas está a presión atmosférica y el aire está de 1 a 2 psi (0,07-0,14 bar). Esta unidad, a través del regulador inspirador, prepara una mezcla para varios quemadores. Pueden suministrar a un cabezal quemador a mayor presión, para sobrepasar las condiciones variables de tiro en el hogar, y mantener una buena capacidad de sobrecarga con mezcla uniforme aire-combustible en todas las cargas.

Combustibles residuales

La combustión de residuos industriales y municipales está ganando una mayor atención a medida que el combustible fósil escasea y se vuelve más caro. Entre los

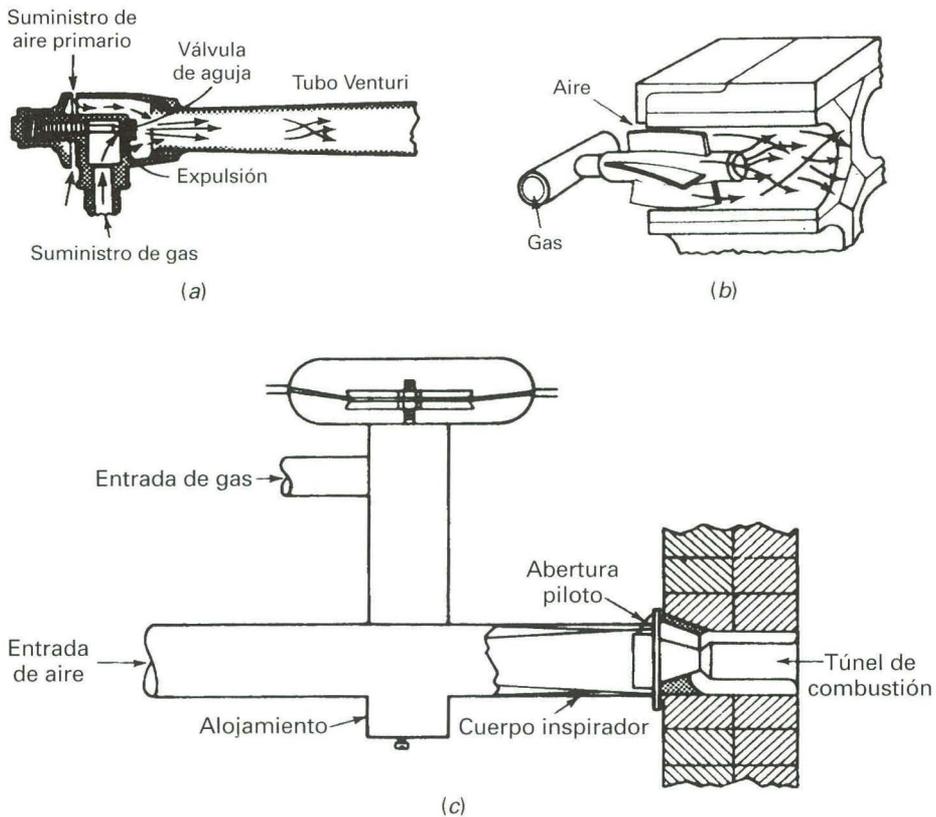


Figura 11.16. Tipos de quemador de gas. (a) Quemador de gas atmosférico. (b) Quemador de túnel de gas. (c) Quemador aspirador de mezcla de aire y gas para la combustión.

combustibles sólidos están los siguientes: madera de las industrias de tablas y carpintería en forma de serrín, rizos, virutas y astillas. Las astillas son residuo de madera cortada en trozos uniformes antes de la combustión. Las cortezas de pino, roble y abeto se queman en hogares especiales. El poder calorífico de la madera varía entre 2.500 y 3.000 BTU/lb (1.500 y 2.520 kcal/kg). El coque es el sólido residual que queda después de la destilación destructiva, ya sea de ciertos aceites petrolíferos o de ciertos carbones bituminoso. El poder calorífico del coque de petróleo va desde 3.500 a 4.500 BTU/lb (6.440 a 8.400 kcal/kg). Véase la Figura 11.15b para ver los poderes caloríficos de los combustibles residuales.

El fabricante de calderas debería ser consultado en toda conversión de una caldera de combustible fósil a una de combustible residual. Hay muchas variables a considerar para evitar futuras dificultades de operación. En general, los residuos sólidos se queman sobre un lecho de combustible, o por lanzamiento disperso, en suspensión. Los líquidos se queman por quemadores del tipo de atomización.

El énfasis continuado sobre el control ambiental añade otras consideraciones de diseño: el problema de emisiones por la combustión de combustible residual. Los

colectores mecánicos de polvo se utilizan lo mismo que los lavadores o precipitadores húmedos o secos y los precipitadores electrostáticos para cumplir con las normas de emisión.

Quemadores de combustible combinado. Muchas instalaciones y plantas industriales emplean quemadores de combustible combinado en las calderas grandes, como se muestra en la Figura 11.17, que puede quemar carbón pulverizado, gas-oil, fuel-oil y gas. La razón más normal para estas combinaciones de combustibles es obtener ventajas de las diferencias de precio durante los cambios estacionales anuales, como variaciones invierno-verano en los precios del gas natural o del fuel-oil. El diseño puede incluir también la posibilidad de quemar dos combustibles simultáneamente. Los hogares están diseñados normalmente para quemar gas junto a combustibles líquidos o carbón pulverizado, o para quemar gases solamente. Los diseñadores de la combinación quemador-hogar tratan de conseguir llamas, o longitudes de llama, que no toquen en los tubos, paredes o suelos de tubo y donde el calor radiante sea el método fundamental de transmisión térmica en el hogar.

Quemadores pulsatorios. La combustión pulsante se usa fundamentalmente en las calderas de calefacción de hasta 5.000 lb/hr (2.250 kg/hr) de capacidad, con gas como combustible principal, aunque los fabricantes dicen que también pueden utilizarse quemadores de combustible líquido y sólido. En los quemadores ordinarios de gas, hay un flujo regular de combustible y aire a las cámaras de combustión de las calderas, mientras que en la combustión pulsatoria el gas y el aire se introducen intermitentemente en una cámara especial de combustión geométricamente propor-

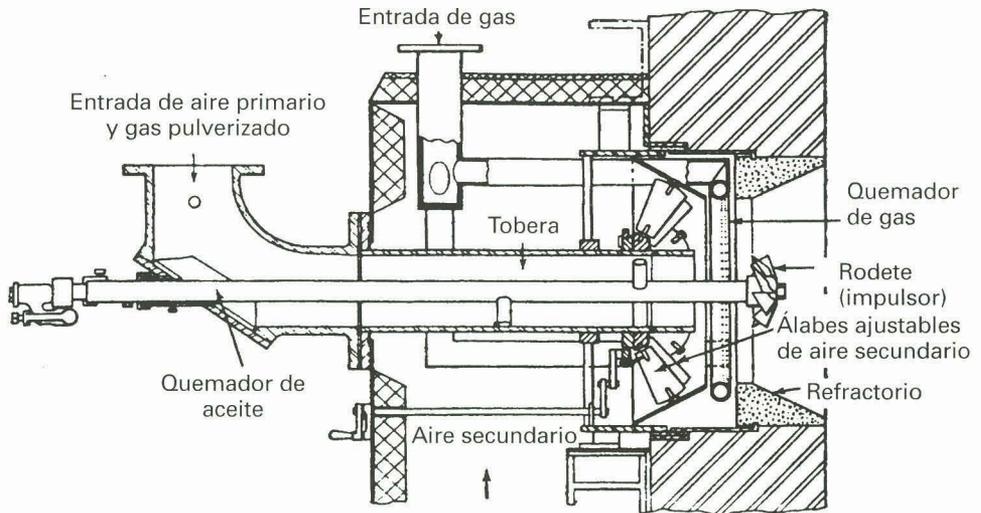


Figura 11.17. La combinación de quemadores puede quemar carbón pulverizado, fuel-oil y gas. Estos tipos de quemadores se usan para plantas e instalaciones industriales para obtener ventajas de las variaciones estacionales en los precios de unos a otros.

cionada que desarrolla una oscilación o combustión cíclica, como se ilustra en la Figura 11.18. La ventaja para este sistema de combustión es que es posible la combustión completa del combustible debido a la entrada cíclica de éste en la cámara de combustión, alcanzándose así una elevada eficiencia de combustión.

Para arrancar un quemador pulsatorio, se suministra un caudal de aire inicial por un pequeño ventilador, se introduce el combustible y se produce la chispa eléctrica mediante una bujía de ignición. El quemador inmediatamente se coloca en modo resonante, con presiones positivas y negativas, como se ve en la Figura 11.18. El ventilador de arranque y la bujía de encendido se desconectan automáticamente una vez que el detector de llama señala que la combustión está iniciada. Los ciclos se suceden, de forma que cada ciclo del quemador deja algo de llama que enciende la próxima carga de mezcla gas-aire.

La relación aire-combustible se mantiene cuidadosamente mediante los modernos dispositivos de medida. Las válvulas vienen reguladas de fábrica para dar el mínimo exceso de aire para una combustión limpia y segura. Las calderas de combustión pulsatoria utilizan un control de presión para comprobar que la llama existe, en vez de electrodos de llama o detectores ultravioleta de llama.

COMBUSTIÓN Y CONTROL DE CARGA

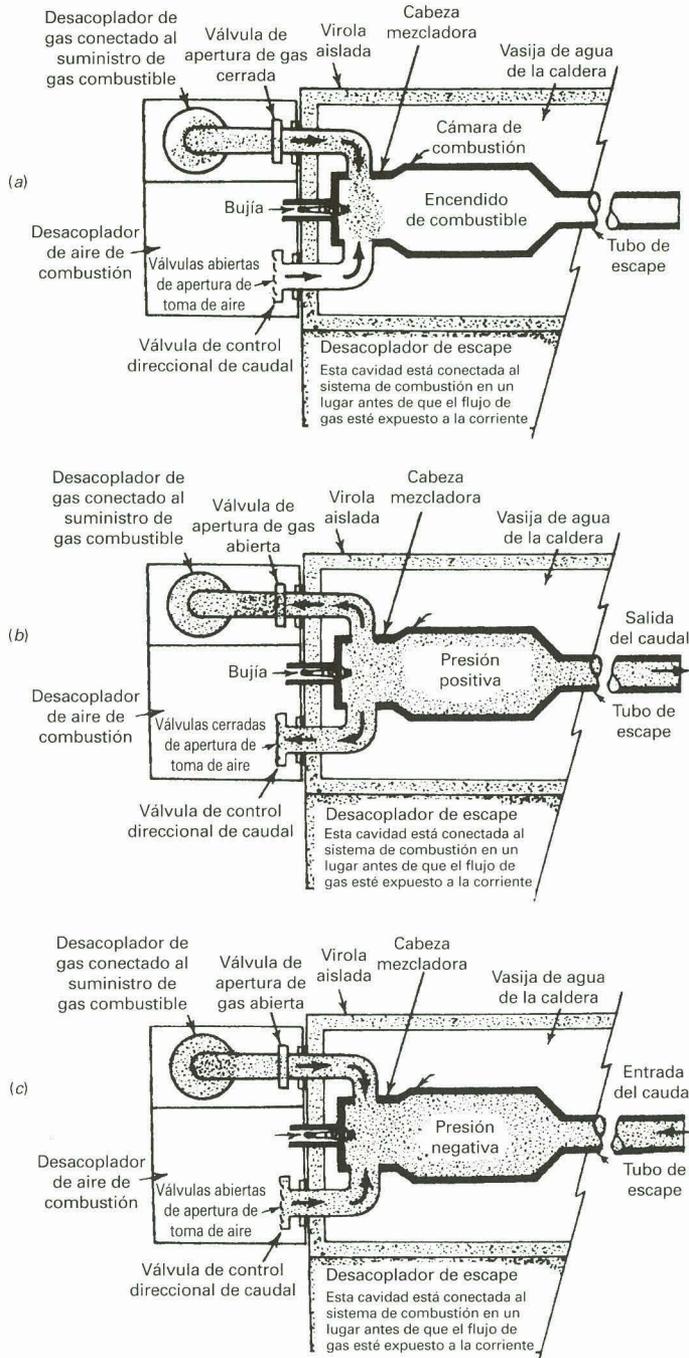
El control de carga de una caldera se gestiona generalmente para mantener constante la presión o la temperatura. La variación de presión se produce por:

1. *Carga de la caldera.* Un aumento de la carga sin entrada de combustible adicional produce una caída de presión. Una disminución de la carga sin una disminución pareja del combustible causa un aumento de presión.
2. *Entrada de combustible a la caldera.* Un aumento en la entrada de combustible producirá un aumento de presión, mientras que una entrada baja causaría una caída de presión.

De este modo, la regulación de presión y combustible, o controles de la combustión, están relacionados directamente. Por esta razón, los controles de combustión están gestionados por modulación a través de las variaciones de presión dentro de unos límites estrechos. Mientras el caudal de aire y el caudal de escape normalmente siguen al caudal de combustible, este último está determinado por el ajuste de los límites de presión dentro de los cuales opera la caldera.

Aunque algunos fabricantes difieren en la aproximación, deben considerarse los siguientes factores en cualquier tipo de control usado en una caldera: 1) presión y caudal de vapor; 2) presión y tiro en el hogar; 3) presión y caudal de aire; 4) presión y caudal de alimentación de agua (incluyendo bajo nivel de agua); 5) caudal y composición de gases de combustión; y 6) encendido y control de llama del quemador adecuados.

La manera en la cual actúa un control y cómo reacciona para restaurar una variable sobre una caldera puede clasificarse en: control todo-nada o de dos posiciones; control de posición y control por medida. Como se describe en el Capítulo 10, los *controles todo-nada* se encuentran normalmente en las calderas pirotubulares más



Una carga de gas y de aire se introduce a través de las válvulas de apertura y cierre en la cámara de combustión diseñada con forma de resonador de Helmholtz para oscilar a frecuencia adecuada. La carga se enciende inicialmente mediante una bujía de encendido, pero después se autoenciende.

Con la combustión, la presión en la cámara de combustión aumenta, cerrando las válvulas en una entrada de aire y combustible. Los productos calientes de la combustión pasan a través de la abertura final de la cámara de combustión; esto lleva a que la presión en la cámara de combustión caiga.

A medida que la presión de la cámara de combustión se hace negativa, las válvulas de aire se abren para admitir carga nueva con la válvula de combustible también temporizada para abrir. La autoignición se alcanza por el calor latente del hogar a partir de la combustión previa, y el ciclo se repite a una frecuencia natural que está determinada por el diseño de la geometría de la cámara de combustión pulsatoria.

Figura 11.18. La combustión pulsatoria tiene tres secuencias. (a) La fase de arranque. (b) La fase de presión positiva. (c) La fase de presión negativa.

pequeñas y en calderas de calefacción de tubos de agua, y no son eficientes a causa de las pérdidas térmicas durante el ciclo en que el quemador permanece apagado.

El control de combustión más utilizado en calderas de proceso es un *sistema de control posicionado*, ya que es más flexible (véase la Figura 11.19 para los controles de combustión utilizados para los diferentes combustibles). La presión de vapor es la variable medida, y un controlador *master* de presión responde a los cambios de ésta del calderín y (por medio de unidades de fuerza o actuadores) posiciona la compuerta de tiro forzado para controlar el caudal de aire y la válvula de combustible para regular el suministro de combustible. Un controlador independiente que posiciona la compuerta de entrada mantiene el tiro en el horno dentro de los límites deseados.

Aunque los sistemas de control de tipo posicionado son una mejora sobre el tipo todo-nada, el caudal de aire y combustible están en su correcta relación teórica, en sólo una posición. Éste es normalmente el punto al cual está calibrada la instalación. El control posicionado también supone que una señal de entrada determinada del control *master* produce siempre los mismos cambios en el caudal de aire de combustión, en la velocidad del alimentador o en el ajuste o calibrado de la válvula de combustible. Pero la velocidad del alimentador estará afectada por las variaciones de la tensión de línea, el caudal de aire, la suciedad o estratificación de los conductos de la caldera o por las condiciones barométricas. El ajuste manual es todavía necesario no sólo en los cambios de carga, sino también para contrarrestar estos efectos a más largo plazo.

Un *control de medida* mide el caudal de combustible y el caudal de aire y así modifica las posiciones de las compuertas de aire y la válvula de combustible para mantener estos caudales controlados antes que sobreentendidos o implícitos. Así se mantiene una relación aire/combustible óptima sobre un amplio rango de carga sin intervención manual. Especialmente valiosa es su compensación inherente para variables tales como limpieza de caldera, bobinas de tensión en actuadores eléctricos, pérdidas de movimiento en dispositivos mecánicos o neumáticos y cambios de calidad del combustible.

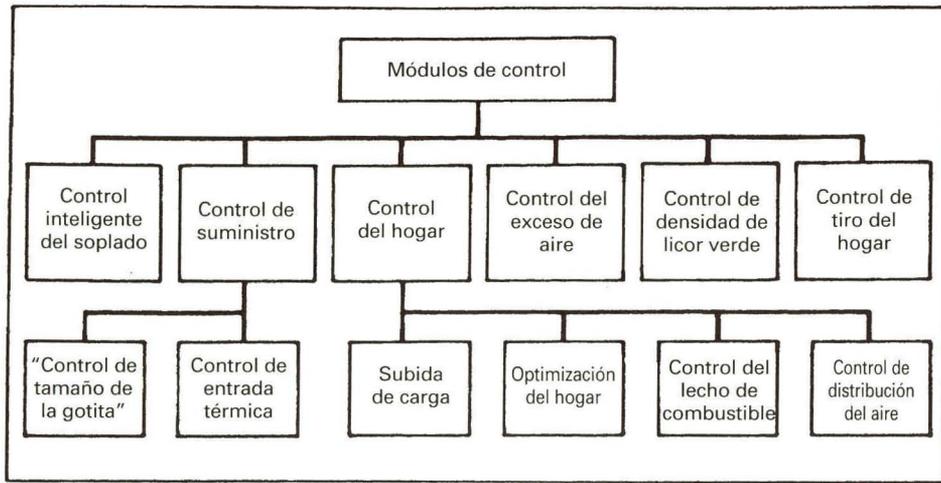
El control de combustión y carga por ordenador está creciendo rápidamente con el aumento de sensores y transmisiones eléctricas de datos al ordenador para calcular el control óptimo de ajuste y así obtener los resultados de diseño deseados. En un sistema de control digital directo, una variable se mide a través de un sensor con las lecturas transmitidas electrónicamente al ordenador. El ordenador puede recibir muchas lecturas semejantes de los sensores, calcular los puntos de ajuste deseados y alimentar esta información a un controlador para una acción rápida (en muy corto tiempo). El controlador está así respondiendo en un rango muy estrecho de resultados deseados, lo que aumentan la eficiencia. Véase la Figura 11.20 de la página 448.

Un *sistema de control distribuido* divide un gran sistema de control en múltiples sistemas de control menores, teniendo cada uno un cierto y determinado control que llevar a cabo. Los múltiples sistemas se comunican, como se ha programado, con un ordenador principal que a su vez está preparado para revisar los resultados de cada estación, calcular los puntos de ajuste objetivos del conjunto, y comunicar a los controladores individuales las correcciones que puedan ser necesarias en el sistema para conseguir los puntos de ajuste totales o el rendimiento total.

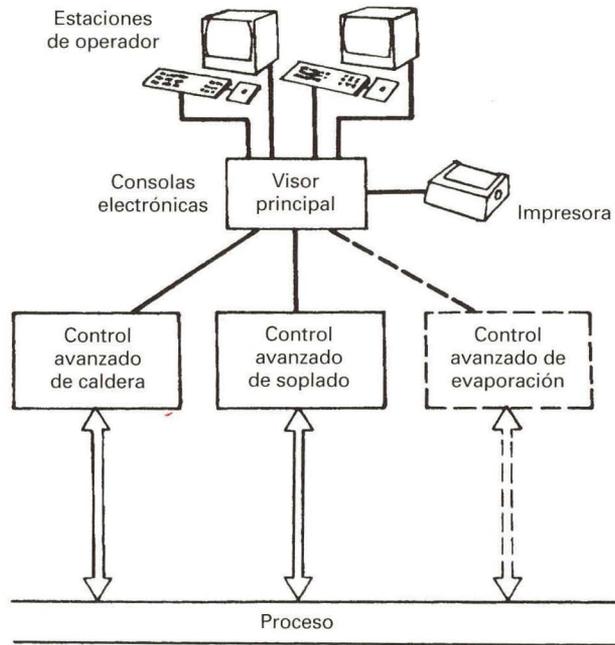
La Figura 11.20a muestra un sistema de control distribuido que regula las diversas secciones de un sistema de caldera de recuperación de licor negro. Los resulta-

Tipo de combustible	Tipo de sistemas de control	Rango de capacidad de la caldera $T_p = 1.000 \text{ kcal}$	Límite de tolerancia; precisión del control de presión o temperatura (en porcentaje de los valores de ajuste)	Precisión del control de la relación combustible aire (% O_2)
Carbón	Todo nada	100 750 T_p o sea 100 750.000 kcal h	± 6	No aplicable.
	Alto bajo nada	500 1.250 T_p o sea 500 1.250.000 kcal h	± 5	No aplicable.
	Posicionamiento modulante	750 15.500 T_p o sea 750 15.500.000 kcal h	± 3	$\pm 1,0$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 2,0$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Semimediación	8.750 18.000 T_p o sea 8.750 18.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,9$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 1,8$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Medición total (base caudal de vapor caudal de aire)	9.500 20.000 T_p o sea 9.5000 20.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,8$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 1,6$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Medición total (base caudal de vapor caudal de aire) con compensación de O_2	18.000 T_p y más	± 3	$\pm 0,6$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 1,2$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Combustibles líquidos derivados del petróleo	Todo nada	100 750 T_p o sea 100 750.000 kcal h	± 6
Alto bajo nada		500 1.250 T_p o sea 500 1.250.000 kcal h	± 5	No aplicable.
Posicionamiento modulante		750 16.000 T_p o sea 750 16.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,5$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 1,0$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
Semimediación		8.750 18.000 T_p o sea 8.750 18.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,4$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,8$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
Medición total (base caudal de vapor caudal de aire)		9.500 20.000 T_p o sea 9.5000 20.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,3$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,6$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
Medición total (base caudal de vapor caudal de aire) con compensación de O_2		17.250 T_p y más	± 3	$\pm 0,2$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,4$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
Gas		Todo nada	100 750 T_p o sea 100 750.000 kcal h	± 6
	Alto bajo nada	500 1.250 T_p o sea 500 1.250.000 kcal h	± 5	No aplicable.
	Posicionamiento modulante	750 16.000 T_p o sea 750 16.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,4$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,8$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Semimediación	8.750 18.000 T_p o sea 8.750 18.000.000 kcal h	± 3	$\pm 0,3$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,6$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.
	Medición total (base caudal de vapor caudal de aire)	8.050 T_p y más	± 3	$\pm 0,2$ para tasas de combustión de, o por encima del, 33% del máximo; $\pm 0,4$ para tasas de combustión de, o por debajo del, 33% del máximo.

Figura 11.19. Tipos de controles de combustión utilizados para diferentes combustibles y capacidades de caldera.



(a)



(b)

Figura 11.20. Control distribuido. (a) Módulos de control remoto utilizados para las diferentes secciones de operación de una caldera de recuperación. (b) Disposición de una sala de control mostrando las diferentes lecturas de salida de las diversas variables para comparación de los puntos consigna. (Cortesía de TAPPI magazine.)

dos se muestran en una estación de operador, como se ve en la Figura 11.20*b*. Desde esta pantalla, el operador puede hacer ajustes sobre todos los puntos consigna de las variables que se suministran, tales como viscosidad del licor negro, entrada de calor a la caldera y algunas de las otras variables mostradas en el módulo de control. Este sistema particular incluso presenta una pantalla de tendencia. Obsérvese la disponibilidad de una impresora para la lectura deseada de pantalla.

Obsérvese también que un operador puede encargarse de este grande y complicado sistema de caldera. La fuerza directora que mueve este avanzado sistema de instrumentación y gestión más avanzada y precisa es la necesidad de recortar costes de operación mediante una mayor automatización y un mayor rendimiento para ahorrar costes de combustible.

Control de sobrecalentamiento. Las grandes calderas de alta presión generan vapor sobrecalentado y recalentado. Temperaturas de 1.000 °F (538 °C) son normales, y hay unidades que trabajan a 1.050 °F (566 °C) y hasta a 1.100 °F (593 °C). A causa de estas temperaturas elevadas que sólo están limitadas por razones metalúrgicas, las temperaturas de vapor deben mantenerse dentro de estrictos límites, tanto por razones de seguridad como económicas. Seis métodos básicos se utilizan actualmente para controlar las temperaturas del vapor sobrecalentado que sale de la caldera:

1. Control de compuerta de *bypass* de gases con una única compuerta o compuertas serie-paralelo para desviar los gases de combustión por el recalentador según se requiera.
2. Control del recalentador tipo *spray* donde el agua se rompería directamente sobre el vapor con un control de la válvula del *spray* de agua para regulación termostática (véase la Figura 10.2*b*).
3. Control del atemperador, donde una parte controlada del vapor pasa a través de un haz tubular desrecalentador sumergido y donde se utiliza una válvula de control en la línea de vapor al desrecalentador o atemperador.
4. Control del condensador con haces tubulares desrecalentadores localizados en la entrada del calderín sobrecalentador y válvula de control de agua o válvulas para regular una parte del caudal de agua de alimentación a través del condensador según se requiera.
5. Control oscilante del quemador allí donde el ángulo de inclinación de los quemadores se ajusta para regular la absorción de calor del hogar y temperatura resultante de vapor.
6. Control de recirculación de los gases de combustión cuando una parte de los gases se recirculan al hogar por medio de un ventilador auxiliar con un control de compuertas para cambiar el caudal másico a través del sobrecalentador y la absorción térmica del hogar, cuando sea preciso para mantener la temperatura del vapor.

CONTROLES DE SEGURIDAD

Los controles de seguridad generalmente son aquellos que limitan la entrada de energía y así cierran o cortan los equipos cuando surgen condiciones de inseguridad.

Éstos son: 1) controles de limitación de presión o temperatura; 2) controles de corte de combustible por nivel de agua bajo; 3) sistemas de salvaguardia por fallo de llama; 4) controles de encendido automático; 5) controles de válvula de corte de combustible gaseoso o líquido; 6) controles interconectados de presión de aire y de combustible; y 7) controles reguladores del agua de alimentación.

Las válvulas de seguridad (o de sobrepresión) son el dispositivo de seguridad más importante. Mientras no se considere otro control en el sentido normal, son la última medida de seguridad contra una explosión importante.

Los controles de seguridad previenen contra los riesgos siguientes:

1. Sobrepresión, fundamentalmente contra explosiones del lado de agua o vapor.
2. Sobrecalentamiento de partes metálicas, que posiblemente conllevan una explosión en la caldera de combustible (por bajo nivel o circulación pobre de agua).
3. Explosiones del lado de fuego (explosiones del hogar) debidas a mezclas incontroladas de combustible en la zona del hogar (o conductos de gases).

Estos tipos de accidentes se consideran mayores y pueden llevar a pérdidas de vidas y serios daños a la propiedad. Otras fuentes potenciales de accidentes son las grietas y ampollas locales en el metal, por sobrecalentamiento debido a depósitos, deformaciones, tales como el abombamiento de tubos o su curvado, adelgazamiento o pérdida de espesores en partes a presión vitales que pueden conducir a rotura local o agrietamiento; fallos, contracción y expansión, produciendo rotura de partes metálicas.

Los fabricantes y la legislación estatal tratan de prevenir, con equipamiento de control y seguridad, los tres tipos principales de accidentes de sobrepresión térmica seca y explosiones del hogar. Mientras los demás fallos se controlan mediante controles automáticos, la prevención está asegurada principalmente por los requisitos de la inspección legal y por unas prácticas más adecuadas de trabajo y mantenimiento, lo que es de esperar del propietario-usuario de una caldera. Están incluidos un tratamiento correcto del agua de alimentación y pruebas de los controles a intervalos periódicos, incluyendo los de las válvulas de seguridad.

La norma *ANSI/ASME CSD-1*, titulada «Controles y Dispositivos de Seguridad para Calderas de Combustión Automática», es una norma que está siendo adoptada por muchas jurisdicciones como obligado requisito, similar a las Secciones I y VIII del código ASME de calderas. Esta norma de seguridad se aplica a calderas no residenciales y para consumos de combustibles hasta 3.150.000 kcal/hora. Entre los controles de seguridad recomendados se encuentran los siguientes:

1. Para calderas de vapor de alta o baja presión:
 - a) Dos dispositivos de corte de combustible por nivel de agua bajo con dispositivo de reenganche manual.
 - b) Dispositivo de corte por presión de trabajo.
 - c) Dispositivo de corte automático por límite superior de presión con dispositivo manual de reenganche.
 - d) Controles de seguridad por fallo de llama para unidades que tengan combustibles líquidos o gaseosos.

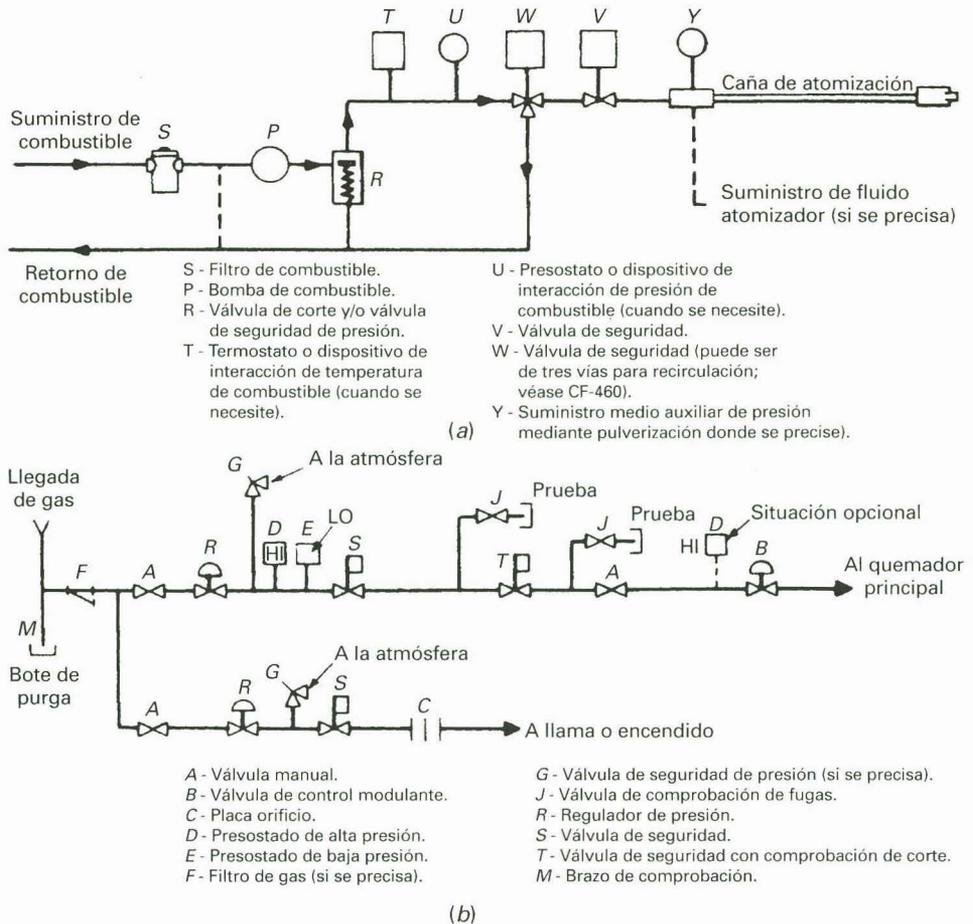


Figura 11.21. Tren de válvulas de combustible recomendado por la NFPA para calderas automáticas de combustibles líquidos o gaseosos hasta potencias de 12.500.000 BTU/hr. (a) Combustible líquido. (b) Combustible gaseoso.

- e) Tren de válvulas de combustible recomendado por la NFPA* para combustibles líquidos y gaseosos. Véase la Figura 11.21.
- f) Conjunto de válvulas de seguridad del tamaño apropiado situadas en o por debajo de la presión de trabajo media de la caldera (*AWP: average working pressure*).
- g) Ninguna válvula de corte entre la caldera y el dispositivo presostático de límite de presión de vapor.
- h) Todo el cableado y controles eléctricos deben cumplir el Código Nacional de Electricidad para el circuito operativo eléctrico esperado y,

* N. del T.: National Fire Protection Association (asociación nacional contra incendios).

como mínimo, debe estar a prueba de humedad y protegido bajo tubo. Los dispositivos eléctricos deben tener el sello o aprobación de la comisión electrotécnica nacional o internacional.

2. Para calderas de alta presión de vapor o agua sobrecalentada:
 - a) Un dispositivo de corte de combustible por nivel agua bajo, con reenganche manual.
 - b) Dispositivo de corte termostático (por temperatura de trabajo).
 - c) Dispositivo de corte termostático (de temperatura límite superior) y rearme manual.
 - d) Controles de seguridad de llama para calderas de combustible líquido y gaseoso.
 - e) Tren de válvulas recomendado por la NFPA para combustible líquido y/o gaseoso.
 - f) Conjunto de válvulas de seguridad dimensionado correctamente a o por debajo de la presión máxima de trabajo de la caldera.
 - g) Todo el cableado y los dispositivos eléctricos deben cumplir las condiciones detalladas en el apartado *h*) para calderas de vapor.

Pruebas periódicas. Esta normativa es para calderas automáticas por debajo de 12.500.00 BTU/hr, pero la norma reconoce la necesidad de prueba de los controles según la frecuencia establecida en la Tabla 11.1. Uno para cada elemento listado. Estas pruebas son para verificar su correcto funcionamiento por el personal según formación y experiencia requerida: 1) el operador que controla la operación de la caldera; 2) el técnico de servicio; y 3) el representante del fabricante.

SISTEMAS DE SEGURIDAD DE LLAMA DEL QUEMADOR

Un sistema de seguridad de llama consiste en un dispositivo de sistema de detección de llama, interconexiones y relés que detectan la presencia sensible de una llama adecuada y correcta en un hogar e inducen y provocan el corte de combustible al quemador si se desarrollan condiciones de riesgo (llama o combustión inadecuadas). Los modernos controles de los sistemas de combustión están interconectados con los sistemas de seguridad de llama y también con los dispositivos de limitación de presión, dispositivos de nivel de agua bajo y otros controles de seguridad que cortarían la entrada de combustible a la caldera cuando se presenten unas condiciones peligrosas. De este modo, es obvio que un sistema de seguridad moderno de llama cumple dos funciones: detecta la presencia de una llama buena o una combustión adecuada y programa la operación de un sistema de quemadores de forma que los motores, ventiladores, antorcha y válvulas de combustible se encenderán sólo cuando sea necesario y, además, en la secuencia apropiada.

Una explosión del hogar es la ignición y casi instantánea combustión de gas explosivo, gas, vapor altamente inflamable o incluso polvo acumulado en la caldera. A menudo es de una fuerza expansiva mayor que la que la caldera puede soportar. En las explosiones menores, llamadas «bufidos», soplos, retrocesos de llama o

Tabla 11.1. Comprobaciones y pruebas periódicas para calderas de marcha automática.

<i>Elemento</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Elemento</i>	<i>Frecuencia</i>
Manómetros, termómetros y aparatos indicadores.	Diaria	Aire de atomización-interconexión de vapor.	Anual
Ajustes de instrumentos y equipos.	Diaria	Seguridades y controles de presión de gas alta y baja.	Mensual
Control de tasa de combustión.	Semanal Semianual Anual	Seguridades e interconexión de presión de combustible alta y baja.	Mensual
Compuertas de gases, tiro, chimenea o compuerta exterior.	Mensual	Seguridades e interconexión de la temperatura del combustible alta y baja.	Mensual
Antorcha de encendido.	Semanal	Control de interconexión de la válvula de combustible.	Anual
Válvulas piloto y principal de combustible.	Semanal	Control de purga.	Anual
Piloto principal de combustible líquido o gaseoso.	Anual	Control e interconexión de la posición del quemador.	Anual
Controles de seguridad de la combustión.		Control e interconexión del quemador rotatorio.	Anual
Fallo de llama.	Semanal	Control de arranque en fuego bajo.	Anual
Fallo de tensión o señal de llama.	Semanal	Control automático de cambio de combustible (combustible dual).	Al menos anual
Pruebas encendido de la antorcha o llama piloto.	Cuando se precise/ anual	Válvulas de seguridad.	Cuando se requiera
Estado de los refractarios (toberas).	Cuando se precise/ anual	Inspección de las piezas esenciales del quemador.	Semianual
Alarma y corte por nivel de agua bajo.	Diario/ semanal		
Control de seguridad de nivel alto.	Anual		
Control operativo.	Anual		
Tiro, ventilador, presión de aire y dispositivos de gobierno de compuertas.	Mensual		

resoplidos, las llamas pueden soplar repentinamente hasta una distancia de muchos metros de distancia de las puertas y mirillas de observación. Tales explosiones menores indican condiciones peligrosas, incluso si no se han producido daños reales. Las explosiones mayores pueden destrozar los baffles de gases, abollar las paredes de la membrana, perder refractarios de los ajustes de topes en ladrillería a través de la

cubierta, soplar y desencajar las paredes laterales de la parte inferior de la caldera, romper las tuberías de conexión e incluso demoler los alojamientos de la caldera. La causas principales de explosiones del hogar son:

1. Fallo de llama que da lugar a la entrada de líquidos o gas inerte en el sistema de combustible de la caldera.
2. Purga insuficiente antes del primer encendido del quemador.
3. Error humano.
4. Fallo de los controles automáticos de la válvula reguladora de combustible.
5. Fugas o pérdidas de la válvula de corte de combustible.
6. Relación aire/combustible desequilibrada.
7. Fallo de los sistemas de suministro de combustible.
8. Pérdida de tiro del hogar.
9. Fallo de la antorcha de encendido.

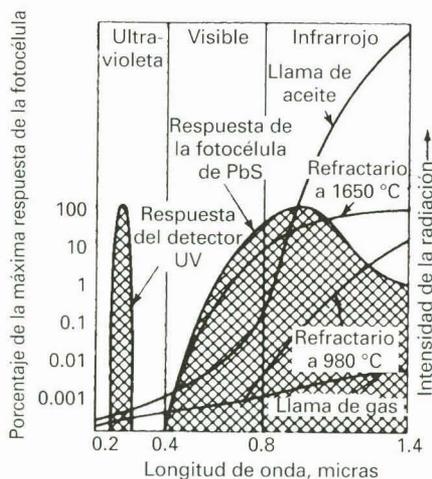
Han ocurrido varios incidentes de *implosiones del hogar*, con resultado de daños considerables a la instalación de la caldera. Estas implosiones del hogar han tenido lugar en calderas de tiro equilibrado y combustible fósil, donde se desarrolló suficiente fuerza para sobrepasar la tensión estructural del hogar de la caldera. Las implosiones han ocurrido en calderas de carbón o combustible líquido con los incidentes descritos divididos equitativamente y por igual entre los dos combustibles. No se han descrito incidentes en unidades de gas natural, porque pocas calderas de gas son de tiro equilibrado. Todos los incidentes registrados ocurrieron en calderas de tiro equilibrado con ventiladores de tiro inducido con elevada capacidad de aspiración, operando, al menos momentáneamente, en condiciones de caudal bajo. Todas las implosiones han sucedido sin combustible principal, algunas ocurrieron antes de encender el combustible principal y otras han sucedido después de un encendido con el combustible principal.

Las implosiones en el hogar se han producido por dos condiciones, ambas implicando la operación de ventiladores de alto tiro inducido en condiciones de carga baja o caudal bajo:

1. Un mal funcionamiento del equipo regulador del flujo de gases en su recorrido por la caldera, incluyendo el suministro de aire y eliminación de gases, dando como resultado que el hogar estuviese expuesto a la total capacidad de succión del ventilador de tiro inducido; normalmente esto ocurre a caudal bajo y presión del ventilador centrífuga elevada, y a menudo en combinación con una interrupción del circuito de tiro forzado.
2. Rápida caída de la temperatura y presión del gas del hogar como consecuencia de una reducción rápida de la entrada de combustible o fallo del combustible principal, similar a unas condiciones de fallo de llama.

Dispositivos de monitorización de llama. Muchos dispositivos de monitorización de llama están basados en los siguientes principios físicos de una llama (Figura 11.22a).

1. La llama produce una zona ionizada, lo que significa que puede conducir una corriente eléctrica a su través. Los electrodos detectores de conductivi-



COMPARACIÓN DE SEGURIDADES DE LLAMA

Principio de detección	Rectificación	Infrarrojo	Luz visible	Ultravioleta	
Tipo de detector	Electrodo rectificador	Fototubo rectificador	Fotocélula de sulfuro de plomo	Fotocélula de sulfuro de cadmio	Tubo detector de rayos UV
Ventajas					
Mismo detector para llama de gas o aceite					
Puede detectar llama en tres dimensiones					
El ángulo de visión puede orientarse para detectar llama en dos dimensiones					
No afectado por refractario caliente					
Autocomprueba sus propios componentes antes de cada arranque					
Puede utilizar cableado de plástico no apantallado					
No hay problema de instalación por el tamaño					
Desventajas					
Dificultad para visualizar el mejor punto de ignición					
La exposición al refractario caliente puede reducir la sensibilidad a la oscilación de la llama y requerir enfoque por orificio					
Electrodo sujeto a rápido deterioro y combado por la alta temperatura					
No sensible a duras premezclas de flujo de gas					
Límite de temperatura excesivamente bajo para algunas aplicaciones					
El resplandor de los gases calientes enfrente del refractario caliente puede producir simulación de llama					
El refractario trasero caliente puede producir simulación de llama					
La autoignición eléctrica puede producir simulación de llama					

Figura 11.22. (a) Las propiedades de la llama son usadas por los detectores para buscar y detectar la llama. (b) Comparación entre detectores de llama.

dad de la llama utilizan el principio de la conductividad de la llama para la monitorización de la detección de llama.

2. La llama puede rectificar una corriente alterna. Esto se hace por medio de un electrodo a través de una llama mayor que otra, haciendo así que los electrones fluyen a través de la llama más fácilmente en una dirección que en la opuesta.
3. La radiación de la luz es un fenómeno conocido de cualquier fuego o llama. Una llama emite energía en forma de ondas que producen calor y luz. Los tres tipos de radiación de una llama son:
 - a) Luz visible que puede ser observada por el ojo humano. Las longitudes de onda de la radiación visible se extiende sólo desde 0,4 a 0,8 micras (μm). Cuando el cadmio se expone a la luz visible, emite electrones con la longitud de onda de la luz visible. De ese modo, si una fotocélula de cadmio se integra en un circuito electrónico adecuado, la electricidad fluirá cuando el cadmio se exponga a luz suficiente. Esta electricidad puede utilizarse para rearmar un circuito-relé de detección de llama.
 - b) La radiación infrarroja cubre la mayoría de las bandas usuales de longitudes de onda y también cubre la mayoría de la intensidad de radiación. Los detectores infrarrojos son adecuados para llamas de gases y combustibles líquidos. Como el refractario caliente también irradia infrarrojos, los visores deben evitar los refractarios calientes. Las células de sulfuro de plomo se usan para detectar la radiación infrarroja. De modo diferente, la fotocélula de cadmio no emite electrones, pero tiene la propiedad de tener su resistencia eléctrica reducida mientras se expone a la radiación infrarroja. Cuanto mayor sea la intensidad de la radiación, menor será la resistencia del sulfuro de plomo. Si está conectada a un circuito electrónico bien diseñado, este principio se utiliza para el objetivo de detección de llama.
 - c) La radiación ultravioleta es el último detector de llama basado en el fenómeno de sensibilización a la intensidad de radiación ultravioleta de una llama. Es insensible a la radiación visual e infrarroja y no está afectada por los refractarios calientes, ya que éstos normalmente no dan radiación ultravioleta apreciable. Cuando la radiación de una llama pasa a través del típico visor de cuarzo de uno de estos detectores en un tubo (célula) sensible a la llama, el tubo o célula se hace conductor eléctrico. La intensidad de la señal detectada o corriente que pasa a través del tubo o célula sensible depende del tipo de combustible, tamaño y temperatura de la llama y distancia entre el detector de llama y la llama. La Figura 11.22a muestra algunas longitudes de onda típicas de una llama y los porcentajes de respuesta de las longitudes de onda totales de los dispositivos típicos de detección de llama.

Tipos de detectores. El tipo de detector de llama depende del combustible usado, tipo de quemador y tamaño y disposición de la caldera. Los detectores de llama varían desde los utilizados en las calderas domésticas pequeñas a los de las grandes calderas. Los tipos de detectores y la tarea que cada uno cumple son:

1. Dispositivos de chimenea, sensor térmico.
2. Electrodo detector de llama rectificador, sensible térmicamente.
3. Fococélula rectificadora, sensible a la luz visible.
4. Fococélula de sulfuro de plomo, sensible al infrarrojo.
5. Fococélula de sulfuro de cadmio, sensible a la luz visible.
6. Tubo detector de llama ultravioleta, sensible a la luz ultravioleta.

A pesar de que cada uno de los dispositivos sensibles a la llama pueden ofrecer una protección sustancial si están adecuadamente instalados, todos están sujetos a ciertas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Por ejemplo, la célula de sulfuro de plomo y la célula fotoeléctrica están sujetas a las siguientes limitaciones (hay alguna variación entre cada tipo):

1. *Discriminación entre quemadores:* Con más de cuatro quemadores en un hogar, se hace difícil localizar la célula sensible donde no pueda estar afectada por la llama de un quemador adyacente cuando cuando la llama del quemador sobre la que está montada se ha extinguido.
2. *Temperatura ambiente del sensor de célula:* La temperatura ambiente elevada de las células sensibles (que se obtienen fácilmente en las ubicaciones donde deben instalarse) pueden dar como resultado señales erráticas, señales falsas y una vida corta. Se ha utilizado aire y agua de refrigeración para disminuir, prevenir o minimizar estas limitaciones.

El electrodo detector de llama está sujeto a: 1) corta vida de servicio por alta temperatura de llama; 2) ensuciamiento de aisladores, causando cortocircuitos y fallos, 3) dificultad de suministrar suficiente área de electrodo a tierra; y 4) limitado generalmente a llamas piloto y pequeños quemadores. La Figura 11.22*b* hace algunas comparaciones de los diferentes sistemas de salvaguardia de llama.

El sistema de impedancia rectificadora de llama (Figura 11.23 de la página siguiente) opera sobre el principio de que la llama o la fococélula expuesta a una llama es capaz de conducir, así como de rectificar, una corriente alterna. Esta corriente alterna se aplica bien a un electrodo de llama insertado en la llama o bien a una fococélula situada en la llama. La corriente resultante rectificadora, que puede producirse sólo cuando hay llama, es a su vez detectada por el relé.

REQUISITOS DEL CÓDIGO NFPA

La prevención de explosiones en el hogar es un requisito detallado en código NFPA, así como por las agrupaciones de ingenieros de seguros de incendios, tales como el *Industrial Risk Insurers* y los grupos *Factory Mutual*. Los códigos de la NFPA son útiles para detallar los requisitos de prevención de explosiones de hogar. Por ejemplo, el código NFPA para gas y el Código para combustibles líquidos estipulan que deben programarse procedimientos de registro y puesta en marcha. El procedi-

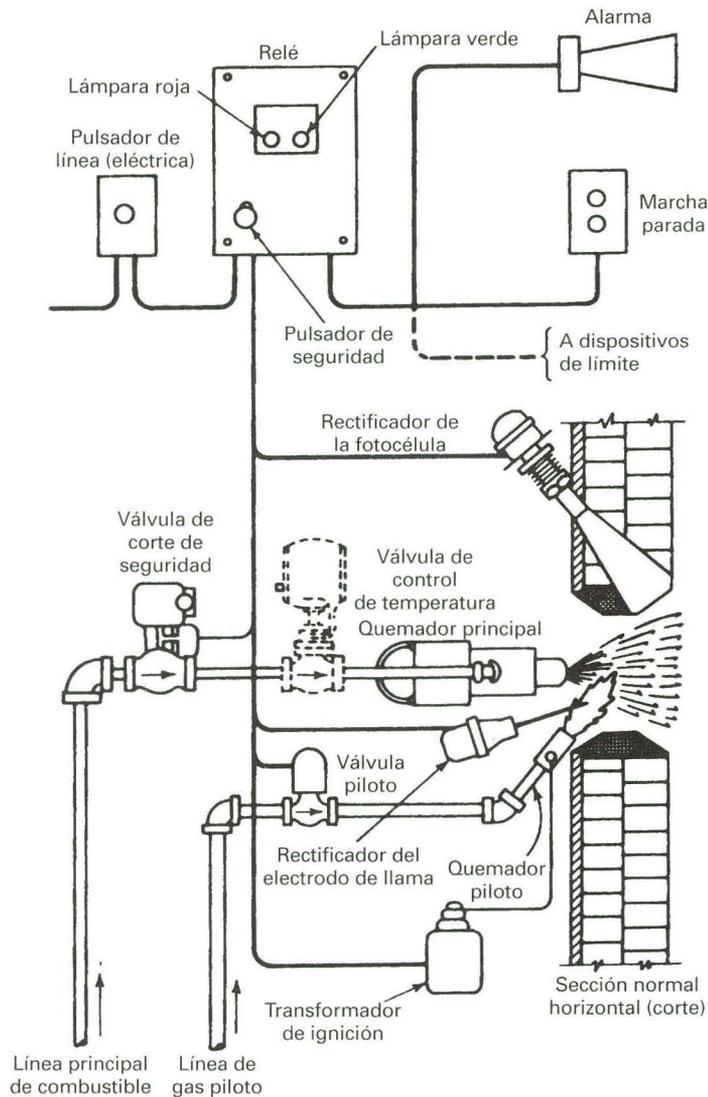


Figura 11.23. El sistema de seguridad de llama por impedancia rectificadora opera sobre el principio de que la llama es conductora.

miento de arranque con registro abierto para gases se describe en resumen del siguiente modo:

1. Ajuste todos o la mayoría de los registros de aire del quemador en la posición normal de combustión. Después purgue el hogar y ajuste la caldera, utilizando no menos del 25 por 100 del caudal de aire a plena carga durante cinco minutos.

2. A lo largo del período de arranque, mantenga el mismo ajuste de los registros y el mismo caudal total de aire utilizando para la purga.
3. Ajuste una presión de combustible a un valor que suministre un caudal de combustible compatible con el caudal de aire del quemador.
4. Encienda los quemadores uno cada vez a medida que se necesite mayor demanda térmica, manteniendo la presión del quemador y el ajuste de los registros en sus ajustes iniciales. A medida que apague un quemador, cierre el registro del quemador a su posición de desconectado. Como el hogar está enriquecido en aire, los quemadores adicionales pueden conectarse y desconectarse sin aumento del caudal de aire hasta que el caudal de combustible se aproxime al 25 por 100 (o siempre que el caudal de aire se utilice durante la purga).

Otro requisito que se encuentra en los códigos anti-incendio, así como en el código de seguridad ANSI/ASME CSD-1, titulado «Controles y Dispositivos de Seguridad para Calderas Automáticas de Combustible», es el sistema de doble válvula de corte en los trenes de válvulas de combustible. Esto generalmente requiere que el quemador principal tenga dos válvulas de corte y seguridad de reenganche manual. Esta disposición asegura el corte del quemador, incluso si una de las válvulas queda fijada en posición de abierta.

Las leyes estatales están siendo ampliadas para incluir el riesgo de explosión del hogar en los programas americanos de inspección estatal. Por ejemplo, un estado tiene los siguientes requisitos para calderas de calefacción automáticas en su código de inspección:

1. *Calderas de combustible gaseoso:*
 - a) El quemador piloto o antorcha de encendido debe probarse, sea de modo manual o automático, antes de permitir que se abra la válvula principal de gas, bien sea manual o automáticamente, por acción de un circuito eléctrico.
 - b) Se establece una prueba temporizada para el período de ignición basada en la cantidad térmica de entrada al quemador. Por ejemplo, para tasas térmicas de entrada de 100.000 kcal/hora a 1.260.000 kcal/hora por cámara de combustión, la prueba, o sea, el período de ignición para el piloto de las calderas automáticas es de 15 segundos. Y la maniobra para el quemador principal en lo que respecta al tiempo de ignición no puede exceder de 15 segundos.
 - c) Los controles de fallo de llama del quemador deben cortar el combustible dentro del tiempo estipulado, de nuevo dependiendo de la entrada de combustible al quemador. Para un quemador tarado para una entrada de combustible de 100.800 kcal/hora o más, el circuito eléctrico para la válvula principal de combustible debe desactivarse automáticamente dentro de los 4 segundos después del fallo de llama, y la válvula desactivada debe cerrarse automáticamente dentro de los 5 segundos siguientes.
2. *Calderas de combustible líquido:* Deben adoptarse previsiones similares, con requerimientos o tiempos de respuesta para los controles para cortar el que-

mador basado en la entrada térmica en kg/hora de combustible (en vez de kcal/hora). La llama debe ser supervisada continuamente por los controles.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Qué tres condiciones determinan, además de las reacciones químicas, que la combustión tenga lugar?

RESPUESTA: Las tres condiciones que son necesarias generalmente son: 1) mezcla adecuada combustible/aire; 2) íntima mezcla de combustible y aire en la zona de combustión, de forma que todas las partículas de combustible tengan oxígeno; y 3) mantenimiento de una temperatura de ignición.

2. Un análisis de gases de combustión mostró los siguientes porcentajes en volumen: CO₂, 16 por 100; oxígeno, 5 por 100. ¿Cuál fue el exceso de aire basado en estas lecturas?

RESPUESTA:

$$\text{Exceso de aire} = \frac{\text{oxígeno en volumen}}{\text{CO}_2 \text{ en volumen}} = \frac{5}{16} = 31,25\%$$

3. ¿Qué temperatura de aire debe suministrarse a un quemador para las siguientes condiciones: temperatura en chimenea, 625 °F; carbón quemado a 120.00 libras/hora con un poder calorífico de 150.00 BTU/libra; gas de combustión formado, 13.8 libras/hora de combustible quemado; rendimiento de caldera, 80 por 100?

RESPUESTA: El calor perdido por la chimenea es:

$$12.000 (1 - 0,8)(1.500) = 36 \times 10^6 \text{ BTU/hora}$$

El peso de los gases de combustión que van por la chimenea es:

$$12.000(13,8) = 165.000 \text{ libras/hora}$$

La pérdida térmica es de: $WC_p(T_2 - T_1)$. Sustituyendo y resolviendo T_1 , con $C_p = 0,25$, obtenemos:

$$36.000.000 = 165.000(0,25)(625 - T_1)$$

Así, $T_1 = 245$ °F y por ello debe precalentarse el aire de combustión.

4. ¿Por qué se consideran dos poderes caloríficos para el combustible?

RESPUESTA: Los combustibles que contienen hidrógeno tienen un poder calorífico superior e inferior. El poder calorífico superior se determina en un calorímetro. Por ello, el calor perdido por el vapor de agua que se ha formado al quemar hidrógeno debe ser deducido para obtener el poder calorífico inferior. En la mayoría de los cálculos de ingeniería se utiliza el poder calorífico superior.

5. Una caldera quema fuel-oil con un poder calorífico de 18.500 BTU/libra y tiene un rendimiento del 82 por 100 determinado por prueba. El consumo promedio de fuel-oil es de 1.150 libras/hora. ¿Cuál es la pérdida térmica en BTU?

RESPUESTA:

$$\text{Calor desprendido} = 1.150(18.500) = 21.275.000 \text{ BTU/hora}$$

$$\text{Pérdida térmica} = 21.275.000(1 - 0,82) = 3.829.500 \text{ BTU/hora}$$

Así que se pierden 3.829 libras/hora de vapor.

6. En una caldera que quema carbón pulverizado, ¿cuál es el aire primario, secundario y terciario?

RESPUESTA: El aire primario para los quemadores es el aire que se mezcla con el combustible en el quemador. El combustible está íntimamente unido en el aire primario dando como resultado una mezcla rica de aire/combustible, que es cerca de 1/3 del aire total necesario para la combustión completa. El aire secundario se añade alrededor del quemador o a través de las aberturas del hogar para dar el aire adicional para la combustión. Normalmente, para la mayoría de los combustibles, éste es cerca de los 2/3 del total necesario; sin embargo, para calderas grandes de carbón pulverizado, el aire adicional o aire terciario se introduce a través de otras aberturas del hogar para controlar la forma deseada de la llama después de que ha salido de las boquillas del quemador y proporciona el aire final para la combustión completan en el volumen del hogar.

7. ¿Cuál es el efecto pernicioso del azufre en un combustible?

RESPUESTA: El azufre al quemarse produce dióxido de azufre que, cuando se mezcla con agua o vapor de agua, forma ácido sulfuroso que es corrosivo para los tubos, colectores y secciones del economizador de las calderas grandes. El punto de rocío (temperatura a la cual el vapor de agua se condensa) de los gases de combustión ha de vigilarse (especialmente con combustibles de alto contenido en azufre) ya que los gases se enfrían cada vez más en su recorrido a través del hogar, de forma que se puede evitar la combinación del vapor de agua con el dióxido de azufre. Las leyes más recientes contra la polución del aire están en contra del elevado contenido de azufre en los combustibles, ya que el dióxido de azufre es conocido como un contaminante del aire. Los porcentajes de azufre permisible en los combustibles están siendo rebajados desde el antiguo 4 por 100 máximo hasta el 1 por 100 permisible en un futuro cercano.

El azufre en calderas de combustible líquido petrolífero produce la corrosión de los tubos del lado de fuego, especialmente en aquellas calderas que funcionan en modo de regulación todo-nada. En el enfriamiento durante el período «nada» (o desconectado), el dióxido de azufre se combina con el vapor de agua y con el agua de las fugas para atacar los tubos por medio del ácido resultante reformado.

8. Convierta 3'' de tiro en libras por pulgada cuadrada o en onzas por pulgada cuadrada.

RESPUESTA: Como el agua a temperatura normal pesa 62,4 libras/pie³*, dividiendo esta cifra por el número de pulgadas cúbicas que hay en un pie cúbico** nos dará:

$$\frac{62,4}{1,728} = 0,036 \text{ psi/pulgada}^3 \text{ de agua}$$

* 1 pie cúbico = 0,027 m³; 1 pulgada cúbica = 15,625 centímetros cúbicos (cm³);

1 pie cúbico/1 pulgada cúbica = 1,728.

** 1 lb/ft³ = 0,454 kg/0,3³ m³ = 0,454 kg/0,027 m³ = 0,454 kg/27 dm³.

Así que para 3" de presión de tiro = $3 \times 0,036 = 0,108$ psi. Y $3'' \times 2,54 \text{ cm CA} = 7,62 \text{ cm}$
 $CA = 7,62 \text{ m}/100 \text{ CA} = 0,73/100 \text{ kg/cm}^2$

$$1 \text{ lb/pulg} = \frac{0,454 \text{ kg}}{6,25 \text{ cm}} = 0,07264 \text{ kg/cm}^2; \quad 3'' = \frac{0,73/100}{0,07264} = 0,100 \text{ lb/pulg}^2$$

Y como hay 16 onzas en 1 libra, las onzas por pulgada cuadrada serán:

$$0,108 \times 16 = 1,728 \text{ onzas de presión por pulgada cuadrada.}$$

9. ¿Qué significa tiro equilibrado?

RESPUESTA: Una caldera que utiliza ambos ventiladores de tiro forzado y de tiro inducido puede regularse y equilibrarse entre las cantidades de aire y gases de combustión obtenidos, de forma que la presión del hogar es casi atmosférica. Esto da como resultado un mejor control de las fugas de aire del hogar así como de controlar la relación aire/combustible.

10. ¿Cuáles son los porcentajes de exceso de aire para quemar los diversos combustibles en calderas?

RESPUESTA: Para carbón, normalmente se usa un 50 por 100 de exceso de aire. Con combustibles líquidos, gas o carbón pulverizado, el exceso de aire es del 10 al 30 por 100.

11. ¿Para qué capacidad de caldera se aplican las leyes federales del aire limpio? ¿Cuáles son algunos de los requisitos sobre límites previsibles?

RESPUESTA: La EPA (agencia de protección ambiental) ha establecido normas mínimas para calderas que queman combustibles fósiles con capacidades de 63 millones de kcal/hora de combustible o mayores. Sin embargo, en su campo de actuación global, pueden citarse severas violaciones por debajo de esa capacidad por exceder los siguientes requisitos: 1) que la emisión de partículas no exceda de 0,0454 kg por cada 252.000 kcal/hora de entrada de combustible; 2) que no se produzca una opacidad mayor del 20 por 100, excepto hasta el 40 por 100 de opacidad durante 2 minutos permitidos en una hora; y 3) emisiones de dióxido de azufre limitadas a 0,544 kg por cada 250.000 kcal/hora de combustible.

12. ¿Qué se entiende por hogar de solera seca comparándolo con un hogar de solera húmeda?

RESPUESTA: Sobre calderas de carbón pulverizado, el diseño del hogar depende del tipo de carbón que se va a quemar; sin embargo, los diseñadores pueden concebir hogares para quemar carbón de cualquier punto de fusión. Si las cenizas resultantes de la combustión del carbón van a la chimenea y las restantes van al fondo del hogar, se utiliza el término «hogar de solera seca». Para carbones de bajo punto de fusión, en las escorias y cenizas resultantes de la combustión pueden estar en forma líquida y fluir al fondo del hogar o solera de donde han de eliminarse en las tolvas después de su solidificación al enfriarse. Este tipo de hogar se denomina «hogar de solera húmeda».

13. Explique los términos de lecho fluido, lecho o combustión en suspensión y combustión recirculante en un hogar de caldera.

RESPUESTA: *Combustión en suspensión* implica la salida de un combustible gaseoso, líquido o pulverizado de un quemador. Como el gas es fácil y está listo para quemarse

por mezcla con el aire, los quemadores de gas necesitan sólo una parte del volumen de aire para asegurar una buena mezcla. Pero el carbón y los combustibles líquidos deben mezclarse íntimamente y en proporciones adecuadas para quemarse bien. Esto significa convertir el combustible de hidrocarburo líquido a otro gaseoso. Para el carbón implica la destilación de la materia volátil (hidrocarburos gaseosos más hidrógeno y monóxido de carbono). Todo esto se realiza en el instante después de entrar el combustible en el hogar y mientras se halla en suspensión.

En la *combustión en lecho fluido*, el combustible es conducido, impulsado o goteado finamente sobre una parrilla hacia el interior del hogar. El aire fluye hacia arriba a través de la parrilla y lecho de combustible; el carbón verde se calienta, se destilan sus materias volátiles y el coque se queda en la parrilla. Los volátiles del carbón y el monóxido de carbono del coque se queman sobre el lecho de combustible con el aire que ha atravesado dicho lecho. El aire secundario normalmente se admite por encima de la parrilla. Del 40 al 60 por 100 del calor del carbón se produce en forma de gas que se libera por encima del lecho de combustible.

En la *combustión recirculante*, cerca del 50 por 100 de la combustión tiene lugar por encima del lecho fluido con el resto teniendo lugar fuera del lecho de combustible. Corrientes separadas de combustible en forma de gas y aire, llamadas corrientes estratificadas, impiden la buena mezcla de gas y aire y, por otra parte, se suministra un exceso de aire de modo que el gas y el aire se mezclan para completar la combustión.

14. ¿Cómo se evita que entren en el quemador de carbón las partículas metálicas?

RESPUESTA: Los cuerpos metálicos pueden producir chispas y provocar un incendio en el quemador; sin embargo, se instalan separadores magnéticos en la alimentación al quemador para que se retire cualquier cuerpo o partícula metálica.

15. ¿Qué es un carbón aglutinante o formador de costra o escoria y qué es un carbón sin escorias?

RESPUESTA: Un carbón de escoria es aquel que se funde superficialmente cuando se quema para formar una costra más o menos pesada. El término «bizcocho» también sirve para denominarlo. Un carbón de combustión limpia o libre no forma costra o escoria y es friable (fácil de desmenuzarse o pulverizar) en el proceso de combustión.

16. ¿Cuáles son algunas de las impurezas minerales del carbón?

RESPUESTA: Una de ellas son las cenizas, que son materiales minerales incombustibles que quedan cuando el carbón se quema completamente. La cantidad y características de las cenizas constituyen los factores de más importancia en los problemas de lecho fluido y del hogar tales como la «clinquerización» y las escorias. Un incremento del contenido de cenizas normalmente significa un aumento del carbón desperdiciado o quemado imperfectamente. Los siguientes son los gases incombustibles tales como el dióxido de carbono y el nitrógeno. Cuando destilan la materia volátil, queda un combustible sólido, consistente principalmente en carbón pero que contiene algo de hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno que no son arrastrados por los gases de combustión al exterior. El azufre del carbón arde pero es indeseable y potencialmente corrosivo. Además de producir «clinquerización» y escorias, corroe los calentadores de aire, economizadores, conductos o acoplamientos metálicos y chimeneas. También causa combustión espontánea en el carbón almacenado.

17. ¿Por qué deben proveerse sopladores en las calderas de carbón?

RESPUESTA: Los sopladores deben proveerse y suministrarse para limpiar las cenizas de las paredes del hogar y de otros puntos estratégicos a lo largo de la caldera para eliminar las cenizas adheridas en estos puntos, si la unidad es grande.

18. ¿Por qué debe analizarse y muestrearse el carbón en una central?

RESPUESTA: Porque el carbón no es homogéneo sino que tiene una composición variable. El muestreo de un determinado envío puede requerir hasta 100 porciones para obtener una buena muestra o sección de toma representativa de las propiedades del carbón en un análisis de laboratorio.

19. ¿Qué sistema de alimentación de combustible es el más difundido y utilizado en plantas industriales?

RESPUESTA: Los dos sistemas de más amplia difusión son la parrilla móvil y los alimentadores de proyección.

20. Nombre tres tipos de molinos pulverizadores de carbón.

RESPUESTA: Los tres tipos de molinos pulverizadores de carbón más utilizados son: 1) el molino presurizado con barrido de aire y de tipo de rodillos y pista; 2) el molino de bolas, utilizando un tambor o cilindro rotatorio con bolas de acero en su interior para moler el carbón; y 3) los molinos de tubo o rodillos que utilizan rodillos o barras en un cilindro rotatorio.

21. ¿Cómo se quema el carbón pulverizado?

RESPUESTA: El carbón pulverizado primero se muele hasta alcanzar la finura de la harina. Después fluye a través de tuberías y es inyectado en el hogar de modo similar al del fuel-oil. La planta debe tener equipo para secado y pulverización del carbón, transporte al horno u hogar en corriente de aire e inyectado con aire para la combustión. Debe mantenerse una correcta relación aire/combustible para evitar explosiones de gas en el hogar provenientes de combustible inquemado que de repente entra en ignición.

22. Cómo se quema el carbón pulverizado por el método de suspensión?

RESPUESTA: La combustión en suspensión, como consecuencia de que las partículas de carbón finamente molido son inyectadas en el hogar y expuestas al calor radiante de la llama, la temperatura aumenta y las materias volátiles destilan. Entra suficiente aire primario al quemador para mezclarse con las partículas de carbón y quemar el gas resultante de la destilación separada de cada partícula. Las materias volátiles, en su mayor parte hidrocarburos, arden más fácilmente que el carbón que permanece en la partícula y calientan las partículas de carbón hasta la incandescencia. El aire secundario entra alrededor del quemador, fluye pasando a través de las partículas calientes de carbón, y las quema en formar de llama de varios metros de longitud.

23. ¿Se quema más carbón mediante alimentadores de parrilla o por combustión en suspensión?

RESPUESTA: Hoy hay más combustión en lecho de combustible que en suspensión y la mayoría de los carbones se queman mediante alimentadores. La operación del alimentador implica: 1) impulsión y caída del carbón sobre una parrilla con una región de alta

temperatura del hogar; 2) destilación de parte del carbón como gas de forma que pueda arder por encima del lecho de combustible; 3) exposición del carbón de coque resistente al rojo de modo que pueda ser lavado por el aire entrante a través del lecho de combustible asta que se quemé; 4) eliminación de las cenizas de toda la zona del hogar.

24. Cite los diversos tipos de alimentadores de carbón al hogar.

RESPUESTA: Los alimentadores se dividen en las siguientes clases o tipos, dependiendo de cómo alcanza el carbón el lecho de combustibles: 1) alimentación superior, en la cual el combustible viene desde arriba; y 2) alimentación inferior, donde el combustible entra por debajo. La alimentación superior se hace de dos maneras: 1) alimentación por lanzamiento y 2) parrilla móvil y parrilla de movimiento o de barrotes galopantes.

25. ¿Cómo trabaja un alimentador de proyección?

RESPUESTA: En un alimentador de proyección, el carbón es impulsado en suspensión al interior del hogar mediante paletas o rotores por medio de chorros de vapor o aire comprimido. Los tiros se queman en suspensión a medida que cruzan el hogar, mientras que los trozos más grandes caen sobre la parrilla para formar el lecho de combustible. El lecho de combustible es normalmente fino, pero varía con la demanda de vapor y la clase de carbón. A menudo hay varios minutos de suministro de carbón a la parrilla. Una capa de escoria y cenizas bajo el lecho de combustible junto con el flujo de aire a través de la parrilla ayuda a mantener las partes metálicas a una temperatura segura. El aire se calienta hasta 150-177 °C.

26. ¿Cómo se miden o determinan las características de molturabilidad de un carbón para su pulverización?

RESPUESTA: La ASTM recomienda los dos métodos siguientes: 1) molino de bolas y 2) *Hardgrove*. El molino de bolas mide la energía necesaria para pulverizar los diferentes carbones hallando el número de revoluciones necesario para pulverizar una muestra, de modo que el 80 por 100 pase a través de una malla o criba de 74 μm . El índice de molturabilidad del molino de bolas, en tanto por ciento, se halla dividiendo el número de revoluciones por 50.000.

En la prueba *Hardgrove*, una muestra preparada recibe una cantidad de energía de molienda en un pulverizador o molino miniatura. El resultado se halla pesando el carbón que pasa por una criba o malla de 74 μm . Para hallar el valor de la molturabilidad, se multiplica el peso del carbón que pasa por la criba por 6,93 y se suma 13 al producto.

27. Explique el término *poder calorífico del combustible*.

RESPUESTA: El calor liberado por la combustión rápida y completa de un combustible por unidad de peso o volumen del combustible es el poder calorífico o energético del combustible. Para los combustibles sólidos y líquidos este valor se expresa a habitualmente en BTU/libra o kcal/kg. Para los combustibles gaseosos, se expresa en BTU/pie³ o kcal/m³ en condiciones normales de presión y temperatura, normalmente presión atmosférica y temperatura de 20 °C.

28. ¿Qué propiedades del carbón se determinan en un análisis inmediato?

RESPUESTA: El análisis aproximado determina el porcentaje: 1) de humedad; 2) de cenizas; 3) de materias volátiles; y 4) de carbono fijo. La suma de estos porcentajes debe ser

cien. Usted puede determinar también; la cantidad total de azufre, como porcentaje separado, la temperatura de fusión de cenizas y el poder calorífico.

29. ¿Cómo presentaría usted un análisis de carbón?

RESPUESTA: Hay 5 maneras de presentar un análisis de carbón, pero sólo las tres primeras se utilizan en centrales térmicas: 1) como se recibe; 2) secado al aire; 3) libre de humedad; 4) libre de cenizas y humedad; y 5) libre de humedad y materia mineral. Estas presentaciones de los análisis revelan las características del carbón tal cual se entrega al laboratorio. Son importantes porque dan las características del carbón tal y como se transporta o como se quema y son valores necesarios para la práctica real.

30. ¿Qué son las cenizas del carbón?

RESPUESTA: Como la humedad, las cenizas son una impurezas que no se queman. Deben retirarse del hogar y de la planta, lo que aumenta los costes de transporte y manejo. Como además, las cenizas producen clinquerización y fusión, se comprueba que el número uno de los problemas del hogar y lecho de combustible lo constituyen estas impurezas.

Las escorias y las cenizas son impurezas que no arden como gas y normalmente perjudican a las calderas de carbón. Las partículas sólidas a alta velocidad son arrastradas a través de la caldera en suspensión con los gases. El término genérico de «cenizas volantes» se utiliza para estas escorias y cenizas. Las escorias y cenizas pueden ser muy abrasivas para las secciones tubulares si, por la distribución del flujo, se concentran en los pasos de convección de una caldera.

31. ¿Qué es un hogar de sangría de escorias?

RESPUESTA: En un hogar de sangría de escorias, parte de las cenizas y escorias se retiran de la zona de combustión dirigiendo la llama del quemador sobre una concentración de escorias fundidas. El montón de escoria se mantiene suficientemente caliente para que permanezca fundida de forma que la escoria fluya continuamente sobre un lecho refrigerado por agua o anillo hacia un pozo de apagado donde se desmenuza por el agua.

32. ¿Qué produce el carbón inquemado en los pozos de escoria?

RESPUESTA: El carbón inquemado en los pozos de escoria resulta de alimentar con más combustible del que puede ser oxidado por el aire que fluye moviéndose a través del lecho de combustible. Las causas más normales de esto son: hacer funcionar el alimentador demasiado deprisa; remover la parrilla demasiado; barrotes de parrilla defectuosos; dejar que el carbón caiga a través de los barrotes de parrilla o falta de cuidado en la limpieza de las parrillas.

33. ¿Cómo definiría el cajón de aire de una caldera?

RESPUESTA: Un cajón o caja de aire es un *plenum* o conducto cerrado y presurizado de aire, del cual se suministra aire primario para la combustión a unos quemadores de gas, combustible líquido u hogar de combustibles sólidos.

34. Explique el término «toberas».

RESPUESTA: Son componentes de los hogares de alimentación inferior para admitir aire sobre el carbón a través de retortas.

35. ¿Qué significa «fluidificación»?

RESPUESTA: Fluidificación es la condición que resulta cuando el aire se sopla a través de una parrilla o rejilla en una tasa y con una presión o velocidad suficiente para vencer el peso estático de los sólidos encima de la parrilla hasta un punto donde la masa de estos sólidos, referenciadas como lecho, parece y se comporta como un líquido en ebullición. De aquí el término de *fluidificación*.

36. ¿Cuáles son las ventajas de la combustión en lecho fluidificado?

RESPUESTA: Eliminación de los finos pulverizados, capacidad de inhibición en la formación de cenizas y escorias fundidas manteniendo la temperatura de combustión por debajo del punto de fusión de las cenizas y eliminación del azufre por interacción química con la caliza en el lecho fluidizado.

37. Cite dos métodos de recolectar las cenizas volantes

RESPUESTA: Las cenizas volantes, dependiendo de su tamaño y características, se recogen bien en un precipitador electrostático o bien en un filtro de mangas. Pueden alcanzarse grados de recolección superiores al 99,5 por 100. El filtro de mangas se está haciendo competitivo ahora con el precipitador electrostático como resultado del desarrollo de materiales de fibra de vidrio.

38. ¿Qué factores deben considerarse al modificar o transformar una caldera de gas o combustible líquido para quemar carbón?

RESPUESTA: Para una caldera que fue diseñada originalmente para quemar carbón, deben considerarse los siguientes puntos: 1) la parte inferior del hogar debe modificarse de forma que puedan recogerse las cenizas de éste; 2) deben añadirse molinos pulverizadores, alimentadores de carbón y tolvas y tuberías asociadas; 3) deben añadirse separadores de hollín; 4) los calentadores y sobrecalentadores de aire pueden tener que modificarse para evitar el cegado por cenizas volantes a través de los pasos de convección; 5) las cajas o cajones de aire tendrán que modificarse para acomodar a los nuevos quemadores para quemar carbón.

39. ¿Cuáles son los componentes combustibles clave en el fuel-oil?

RESPUESTA: Los fuel-oil provienen del petróleo, cuyos componentes combustibles principales son el carbono y el hidrógeno. Los pesos específicos de los combustibles varían y están influidos por el origen del petróleo y por la temperatura. A 16 °C, las densidades pueden variar entre 0,84 a 0,96. Como el hidrógeno es el de mayor poder calorífico y menor peso atómico de todos los elementos principales del fuel-oil, las proporciones de carbono e hidrógeno afectan a ambas, densidad y poder calorífico. Por ello, el peso específico constituye una notable guía del poder calorífico de un aceite combustible petrolífero. La gravedad específica en grados aquí se halla dividiendo la densidad respecto al agua (a 15,5 °C) entre 14,5 y restándole 131,5 al resultado.

40. ¿Cuál es una fuente potencial de entrada de combustible líquido al lado de agua de una caldera de vapor de combustible líquido?

RESPUESTA: Un fallo o rotura de un tubo interior de una caldera de vapor calentada por combustible líquido petrolífero puede ocasionar que una caldera se contamine con combustible líquido. Si la presión del combustible líquido es más alta que la presión del vapor, el combustible líquido se verá forzado a entrar en el lado de vapor del recalentador.

dor de combustible y después viajará hacia el lado de agua de la caldera. Para evitar esto, coloque una válvula de comprobación en la línea de vapor del precalentador de combustible de modo que el flujo inverso no pueda tener lugar. Por donde el condensado retoma a la caldera, debería haber una tubería al recipiente de condensado equipado con un nivel de vidrio. Así, el combustible, si lo hay, puede verse a través del vidrio. Se usan a menudo los calentadores de combustible de doble carcasa para seguridad extra.

41. ¿Qué son el punto de goteo, punto de ignición y punto de inflamación en lo que se refiere a los combustibles?

RESPUESTA: Los productos petrolíferos líquidos pueden aumentar su viscosidad cuando la temperatura disminuye. El punto de goteo es el punto en que la temperatura a la cual el combustible cesa de fluir o gotea. El punto de ignición es la temperatura a la cual una muestra de combustible líquido se inflamará o empezará a arder cuando se pone en contacto con una llama libre. Generalmente indicará a qué temperatura del combustible es seguro su manejo. Los aceites petrolíferos destilados se inflaman a una temperatura alrededor de 66 °C. El punto de inflamación o punto de fuego es la menor temperatura a la cual un aceite combustible arde continuamente una vez que ha sido encendido.

42. Cite cuatro métodos de atomizar combustible líquido para su combustión.

RESPUESTA: Los quemadores de combustible líquido atomizan el aceite en finas gotitas que después son rápidamente vaporizadas por los siguientes métodos: 1) bajo presión utilizando aire o vapor; 2) por descarga del aceite a través de orificios o toberas a presión elevada; 3) por centrifugado del aceite mediante una copela rotativa en la boca del quemador para imprimir fuerza centrífuga a las gotitas o hilos de aceite; y 4) mediante un quemador acústico tipo resonador o sirena que tiene un emisor de ultrasonidos localizado justamente delante del punto en el que el combustible abandona la tobera o boquilla del quemador.

43. ¿Qué dificultades pueden esperarse ante la presencia de agua en el combustible?

RESPUESTA: Las dificultades causadas en el combustible por el de agua son: 1) apagado de llama; 2) llama errática o encendido con dificultad; 3) desperdicio de combustible a causa de la ignición lenta o fallida; 4) pérdida térmica por vaporización del agua que hay en el combustible; y 5) corrosión en las líneas y depósitos de almacenaje por el agua (esto puede producir obstrucciones en el quemador).

44. ¿Cuáles son algunas de las razones para la combustión incompleta en la combustión de los productos petrolíferos?

RESPUESTA: La combustión incompleta puede estar producida por una relación aire/combustible incorrecta, por una inadecuada atomización del combustible; por un aceite demasiado viscoso o de viscosidad inadecuada; orificios cegados parcialmente, que interfieren con el mantenimiento de un correcto modelo de pulverización; agua en el combustible; poco tiro y un ajuste incorrecto e inadecuado de la compuerta del ventilador de tiro forzado.

45. ¿Cuál es el efecto del vanadio en el combustible sobre los tubos de las calderas?

RESPUESTA: Los combustibles con alto contenido en vanadio tienen una elevada tendencia a formar cenizas fluidas de tipo plástico a una temperatura de hogar relativamente baja, del orden de los 600 °C. Los depósitos formados sobre los tubos actúan como aislante, reduciendo la transferencia de calor y pueden llegar a ocasionar ampollas en los

tubos por recalentamiento localizado. El vanadio se combina también con el acero en estado de fusión y lo elimina por capas, en la eliminación a menudo denominada corrosión por alta temperatura. La eliminación de estos depósitos duros de vanadio requiere un picado físico de las capas o depósitos del lado de fuego.

46. Determine la potencia necesaria para calentar 40 galones/hora de combustible desde 120 °F a 200 °F (de 49 °C a 94 °C).

RESPUESTA: Una buena aproximación se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia necesaria} = 1,25 \text{ gal/hora} (T_2 - T_1) = 1,25 \times 40 \times (200 - 120) = 4.000 \text{ W o } 4 \text{ kW}$$

O bien, en medidas métricas:

$$\begin{aligned} W &= 40 \text{ gal/h} \times 4,5 \text{ l/gal} \times 0,5 \text{ kcal/kg} \times 0,95 \text{ kg/l} \times (94 - 49) = 3.848 \text{ kcal/h} = \\ &= 3.848 \text{ kcal/h} / 860 \text{ kcal/kW} = 4,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

47. ¿Qué mantenimiento debe llevarse a cabo en los quemadores de combustibles líquidos petrolíferos?

RESPUESTA: Asegurarse de que el quemador consigue un flujo uniforme y libre de sedimentos que puedan obstruir las boquillas. Esto significa evitar el almacenaje de los lodos en los depósitos de almacenamiento y mantener los filtros en buenas condiciones de limpieza. La temperatura de precalentamiento debe ser la correcta para el tipo de combustible y quemador y debe mantenerse uniforme. Vigile para evitar, o en su caso remediar, el desgaste producido por abrasión de las cenizas de combustible y por el cegado o depósitos carbonosos. En los quemadores de copa rotativa, el desgaste de los bordes produce una atomización pobre. Si las copas o copelas no están protegidas adecuadamente después de un cambio o sustitución, se forman depósitos de carbón en el borde. Cuando se apaga el quemador, ábralo siempre, saque la copela fuera del hogar y coloque una protección de llama. Las boquillas de atomización mecánica desgastadas o carbonizadas dan problemas. Reemplace siempre las boquillas de desgastadas y manténgalas limpias.

48. ¿Cuáles son todas propiedades de los combustibles líquidos petrolíferos comerciales?

RESPUESTA: Los combustibles líquidos comerciales se clasifican del grado o número 1 al grado o número 6. Son sus características comunes: 1) viscosidad, en Segundos Saybolt Universal (SSU) o Segundos Saybolt Furol (SSF); 2) gravedad o peso específico, en grados API y/o Beaumé; 3) punto de inflamación; 4) coeficiente de expansión (dilatación); 5) punto de ignición; 6) contenido en vanadio de las cenizas; 7) poder calorífico; 8) contenido en azufre; 9) humedad y sedimentos en porcentaje de volumen que debería permanecer por debajo del 1 por 100; y 10) punto de goteo.

49. ¿Qué reglas creían seguirse en la combustión del fuel-oil?

RESPUESTA: Hay nueve reglas a tener en cuenta cuando se quema fuel-oil: 1) atomizar el combustible completamente para producir un *spray* fino; 2) mezclar el aire y el combustible íntimamente; 3) introducir suficiente aire para la combustión, pero limitar el exceso de aire a un máximo del 20 por 100; 4) mantener un suministro de combustible limpio y expedito a cada quemador; 5) mantener los orificios y pastillas atomizadoras limpias y en buenas condiciones; 6) mantener la relación adecuada entre la pastilla atomizadora y el difusor de aire; 7) mantener la relación adecuada entre el difusor y la tobera refractaria; 8) mantener el cono o tobera refractaria en buen estado; 9) utilizar

el tamaño adecuado de pastilla atomizadora (para el tipo de atomización mecánica) y el número adecuado de quemadores para adecuarse anticipadamente a la carga de vapor.

50. ¿Cómo afectan a la combustión la humedad o los sedimentos?

RESPUESTA: Si se permite entrar en el atomizador, la humedad o sedimento de un combustible producirá chisporroteo, posible extinción de llama, reducción de la temperatura de la llama o alargamiento de la llama. El sedimento es muy perjudicial porque taponan los filtros y las pastillas atomizadoras. Si hay una cantidad importante de sedimento, es necesario limpiar frecuentemente los filtros y los atomizadores. Si hay agua, sedimento o ambos están presentes en gran cantidad, pueden separarse del combustible por calentamiento. Esto se hace mientras el combustible está en los depósitos de sedimentación, u ocasionalmente pasando el combustible a través de una centrifugadora. Los filtros se utilizan siempre.

51. ¿Qué puede estar mal si un hogar da muestras de pulsación?

RESPUESTA: La pulsación o vacilación está producida por una deficiencia o falta de aire considerable a través de los registros. Se puede evitar normalmente aumentando el suministro de aire o disminuyendo el suministro de combustible, pero es algo difícil de hacer si el ajuste es defectuoso por falta de aire. La temperatura demasiado elevada del combustible también produce pulsación y la vibración resultante obliga a cambiar de posición a las compuertas y registros de aire.

52. ¿Por qué se consideran superiores los controles electrónicos a los neumáticos en el proceso de gestión de la combustión en carga?

RESPUESTA: Porque a causa de su aumento de utilización, los costos están comenzando a ser mejores que los de los controles neumáticos y/o mecánicos. Su atractivo principal está en la precisión del control que es posible alcanzar supuesto que los sensores están disponibles con similar precisión, y el hecho de que los dispositivos electrónicos de estado sólido tienen una buena tasa de fiabilidad. Su velocidad de respuesta ha aumentado la eficiencia del consumo de combustible de la caldera y, así, su rendimiento.

El desarrollo de sensores variables para monitorizar la presión, temperatura, caudal y variables semejantes de la central ha permitido la rápida transmisión de estas cantidades medibles a los actuadores eléctricos, tales como servomotores, motores controlados o válvulas solenoides y compuertas para regular con precisión la presión, temperatura, caudal y demás variables dentro de los ajustes y bandas de consigna.

Las señales electrónicas de los sensores pueden también desplegarse y mostrarse en hojas de datos o pantallas para su control por operadores y, si llega el caso, para el ajuste de las variables controladas. Esto ayuda al operador en los programas de diagnóstico del equipo en el ciclo energético.

53. ¿Cómo se están aplicando los microprocesadores a la operación de la planta de calderas?

RESPUESTA: Están siendo aplicados sobre una base segmentada o fraccionada en vez de una base total de ordenador de planta, por ejemplo para un control preciso de la relación aire/combustible. Se pierde energía en la combustión cuando la proporción de combustible/aire no es la relación química o estequiométrica correcta. Se han desarrollado sensores tales como monitores de la opacidad óptica de llama, células de óxido de zirconio para detectar el oxígeno del gas de combustión y analizadores infrarrojos del monóxido de carbono.

Estos sensores pueden emplearse con pequeños ordenadores o microprocesadores que pueden calcular rápidamente la ecuación química para una relación aire/combustible correcta y mandar esta información a los actuadores adecuados (válvulas, compuertas, controladores de velocidad de los ventiladores, etc.) para obtener la relación aire/combustible deseada. Están considerados muy eficaces y eficientes en las variaciones de carga. Muchos de estos microprocesadores están integrados en circuitos de auto-calibración y autodiagnóstico, así como en alarmas integrales.

La mayor ventaja del microprocesador está en su capacidad de control de las variables dentro de unos márgenes de ajuste muy estrechos, de modo que hay muy poca desviación en los parámetros controlados. Esto puede dar como resultado un ahorro energético al evitar los bandazos de consumo de combustible que pueden tener lugar con los controladores neumáticos o mecánicos.

Los citados beneficios por la reforma de los sistemas existentes con los controladores electrónicos modernos son:

1. Los controles existentes pueden estar obsoletos, con recambios y servicios difíciles de conseguir.
2. Algunos controles existentes pueden no cumplir las normas de seguridad actuales. Esto se aplica especialmente a los sistemas de seguridad de llama por célula.
3. Puede requerirse mantenimiento adicional para controles viejos y gastados.
4. El rendimiento se incrementa al mantener las calderas dentro de unos límites estrechos en el control del consumo de combustible.

54. ¿Qué se entiende por modo de control?

RESPUESTA: Modo de control significa la manera de actuar y reaccionar el control automático para restaurar una variable de la caldera, como presión, caudal o temperatura, hasta un valor de control diseñado o deseado. Los tres sistemas de control usados en una caldera son: neumático, eléctrico y electrónico.

55. ¿Por qué son útiles los controles de reajuste manual utilizados sobre los controles de límite alto de presión o temperatura?

RESPUESTA: El mecanismo de reajuste manual en el control de límite alto llama la atención si el control de operación (no el de límite alto) ha funcionado mal, prohibiendo así cualquier operación ulterior de la caldera hasta que se haya corregido el mal funcionamiento. A veces, este mal funcionamiento puede deberse a un contacto eléctrico fundido, una fuga de la válvula de gas con un conducto cortado, etc. De este modo, la caldera no podrá operar hasta que el fallo esté corregido.

56. ¿Qué condiciones son necesarias para producir una explosión en el hogar?

RESPUESTA: Normalmente tres: 1) acumulación de combustible inquemado; 2) aire y combustible en una proporción o mezcla explosiva; y 3) un foco de ignición, como paredes del hogar muy calientes, inadecuada temporización del encendido, antorcha defectuosa y procedimientos de apagado peligrosos en los sistemas de arranque de calderas mediante operación manual.

57. ¿Cuál es el propósito de un dispositivo o control sensible de llama?

RESPUESTA: Un dispositivo sensible de llama es una parte integrante del sistema de control de la combustión. El propósito fundamental de un dispositivo de detección sensible de llama es asegurar que la llama o condiciones de combustión sean seguros y que

se siguen y cumplen las secuencias correctas de encendido y apagado de modo que se obtenga un encendido seguro. En la eventualidad de un fallo de llama durante la marcha, el dispositivo sensor debe ser capaz de enviar una señal de modo que sea cortado el combustible, preferiblemente con una alarma inicial común y el hogar y los gases sufran una purga con aire antes de que se haga ningún intento de re-encendido de quemadores.

58. ¿Qué evita un sistema de seguridad de llama?

RESPUESTA: Explosiones del hogar (explosiones de combustión). Son producidas por la inflamación repentina del combustible acumulado y aire en la zona de llama del hogar de la caldera. Esto puede tener propiedades devastadoras, daños a la propiedad y pérdida de vidas. El sistema de seguridad de llama usado con combustibles diversos y diferentes tipos de calderas está diseñado para sensibilizar, y a veces anticipar, esta acumulación de combustible inquemado y aire en cada zona de llama de la caldera. Corta con seguridad el equipo de combustión, con purga del hogar, normalmente seguido en una secuencia temporal de forma que se conduzca el combustible inquemado y el aire fuera del hogar.

59. ¿Cuál es el rendimiento de una caldera afectada por la adición de controles automáticos?

RESPUESTA: A través de una regulación precisa del combustible, aire, caudal de agua de alimentación y variables similares, las pruebas han demostrado que el rendimiento de una caldera generalmente aumenta con la adición de los controles automáticos de combustión. Se mantiene una presión de vapor uniforme, los refractarios duran más tiempo y se posibilita una regulación mejor hasta la carga máxima. La pericia y habilidades del operador se destinan ahora a mantener los controles en buenas condiciones y a detectar los signos de mal función antes de que el control pueda llegar a estar seriamente dañado.

60. ¿Qué dispositivos de límite se recomiendan generalmente en un sistema de seguridad del control de la combustión?

RESPUESTA: El sistema de seguridad incluirá los siguientes dispositivos de límite incorporados en los circuitos limitadores, de modo que la unidad cortará automáticamente si alguno detecta o indica algunas condiciones inseguras: 1) alta presión de vapor; 2) mal funcionamiento del ventilador de tiro forzado; 3) llama baja en el arranque; 4) alta presión de combustible; 5) baja temperatura del combustible líquido; 6) bajo nivel de agua; 7) pérdidas de llama; y 8) dispositivos de límite adicionales recomendados por los siguientes grupos: «Factory Mutual», «Aseguradoras de Riesgos Industriales» y las normas del «National Fire Protection».

61. ¿Qué precauciones deben observarse al ajustar un quemador sobre un sistema de dos o más quemadores?

RESPUESTA: Cuando un operador efectúa algún cambio en el caudal de combustible o de aire para uno de los quemadores, debería también comprobar el efecto de estos cambios sobre la estabilidad de la llama de los otros quemadores.

62. ¿Qué precauciones debería tener en cuenta un operador para evitar explosiones en el hogar?

RESPUESTA: Las siete precauciones básicas son: 1) comprobar la marcha de la caldera periódicamente; 2) si un quemador se apaga accidentalmente, cortar la antorcha y el suministro de combustible, purgar cuidadosamente el hogar y sus pasos y expulsar los

gases antes de intentar una nueva emisión. Siempre hay que determinar y remediar la causa de la parada; 3) mantener limpios los quemadores y todos los equipos auxiliares; 4) en calderas que usan ventiladores tanto de tiro forzado como aspirado (inducido), comprobar su enclavamiento periódicamente; 5) no atentar contra la seguridad con un CO₂ excesivamente alto, por usar una relación combustible/aire demasiado rica o por suministro inadecuado de aire secundario; 6) mantener la temperatura y presión del aire precalentado, aire seco, fuel-oil, etc., en los niveles adecuados y correctos; 7) nunca permitir que unas condiciones de inestabilidad de llama continúen sin conocerse.

63. ¿Cuáles son las principales condiciones o consideraciones de combustión en calderas de residuos o combustibles residuales?

RESPUESTA: Temperaturas de combustión elevadas y suficiente tiempo de residencia en una zona de combustión es lo que se precisa para obtener una combustión completa en el hogar y no en la zona de convección de la caldera, y también estar seguro de que las normas de calidad del aire sobre las emisiones se cumplen mientras se quema un combustible de calidad variable.

64. ¿Cuál fue el propósito u objeto de los fusibles y por qué no son tan evidentes hoy día en las calderas de combustibles líquidos y gaseosos?

RESPUESTA: El propósito de los fusibles fue dar alarma de unas condiciones de bajo nivel de agua en calderas manuales de carbón y calderas de parrilla con carbón. El núcleo nuevo tiene un punto de fusión metálico bajo, que fundía durante esas condiciones de bajo nivel de agua. El vapor, al escapar, llenará la cámara de combustión y hará un ruido sordo de modo que el operador pueda llevar a cabo acciones correctoras sobre el desarrollo de las condiciones de bajo nivel de agua. Con los combustibles que se queman en suspensión, como aceites o combustibles líquidos o gaseosos, puede ser peligroso extinguir una llama en la cámara de combustión sin cerrar primero la válvula del combustible. Como consecuencia de una acumulación de combustible en el hogar puede tener lugar una explosión en éste. El fusible ha sido reemplazado por el corte por bajo nivel de agua por esa razón.

65. ¿Qué influencia pueden tener las determinaciones del exceso de aire?

RESPUESTA: El exceso de aire es utilizado tanto para completar la combustión del combustible como para aproximar la cantidad de aire teórica necesaria que demuestran necesarias las ecuaciones de las reacciones químicas. Midiendo el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión sobre una base volumétrica, es posible determinar la cantidad de exceso de aire que está siendo utilizada en el hogar de la caldera. Esta lectura, sin embargo, puede estar influida por lo siguiente: 1) cierres del hogar con pérdidas y lo mismo en cierres de caldera; 2) en calderas de presión negativa (hogar en depresión), el aire no usado en la combustión puede entrar a través de rendijas y las entradas de aire llegar hasta la zona de combustión; 3) en calderas de presión positiva (sobrepresión en el hogar), el fuerte tiro de este modo de operación incrementa la cantidad de aire que va por la caldera con los gases de combustión.

