

Bases para el ahorro de energía en calderas y sistemas de vapor



Dirección de Enlace y Programas Regionales
Apoyo al Sector Privado

Contenido

1	Balance de energía y pérdidas	3
1.1	Entradas de energía	3
1.2	Pérdidas de energía.....	3
1.3	Descargas de energía.....	4
2	Poder Calorífico.....	6
2.1	Poder calorífico bruto	6
2.2	Poder Calorífico Neto.....	6
3	Unidad de medida	7
3.1	Joule (J).....	7
3.2	Tabla de equivalencias.....	7
4	Eficiencia.....	8
4.1	Limitaciones.....	8
5	Vapor de agua.....	9
5.1	Propiedades del vapor	9
5.2	Calor sensible	9
5.3	Calor latente de evaporación.....	9
5.4	Determinación del calor en el vapor y el agua.....	10
5.5	Propiedades del vapor de agua.....	11
6	Recuperación de calor del sistema de condensados	12
7	Ahorros	14
7.1	Temperatura de gases en chimenea y exceso de aire	14
7.2	Mejora de la transferencia de calor radiante.....	17
7.3	Temperatura de flama	17
8	Referencias:.....	18

1 Balance de energía y pérdidas

Para poder administrar un programa de control efectivo en los sistemas de vapor, es necesario entender cómo se comporta la energía dentro de éstos; por ello, se tienen que comprender algunos conceptos básicos sobre el tema.

El objetivo principal de un programa de administración de la energía es obtener la mayor cantidad posible de energía del combustible y, además, conocer cuanto puede llegar a ser esta cantidad.

Un balance de energía es un análisis de un proceso que muestra de dónde viene el calor y a dónde va. Las mediciones que se necesitan para obtener un balance de energía completo incluyen: entradas de energía, pérdidas de energía al ambiente y descargas de energía.

1.1 Entradas de energía

La energía entra a la mayor parte de los equipos de proceso ya sea como energía química en la forma de combustibles fósiles, en forma de entalpía sensible de fluidos en movimiento o calor latente en corrientes de vapor o bien como energía eléctrica.

Para cada entrada, es necesario medir la cantidad de flujo de fluido o de corriente eléctrica. Eso significa que si se desea obtener resultados precisos, se requiere la medición de cada flujo. No es necesario medir continuamente cada uno de los flujos parciales, ya que las instalaciones temporales pueden dar información suficiente. En el caso de hornos y calderas sólo se necesita medir la entrada de combustible. Las pruebas de los productos de salida dan información suficiente para derivar el flujo de oxidante (generalmente aire) si se tienen disponibles datos exactos sobre el flujo de combustible.

En el caso de insumos de energía eléctrica, la corriente se mide con un amperímetro que se instala como submedidor. Los amperímetros de gancho son fáciles de obtener y sirven para medir el flujo de la corriente alterna sin necesidad de abrir la línea. Estos son particularmente convenientes en instalaciones temporales.

Además de medir el flujo para cada corriente de entrada, es necesario saber la composición química del caudal correspondiente. Para aire, agua y otras sustancias puras, no se requieren pruebas de composición; pero en el caso de combustibles fósiles, debe determinarse la composición por medio de análisis químicos o bien obtenerla del proveedor de combustible. Para vapores, debe conocerse la calidad, esto es, la fracción de masa de vapor presente en la mezcla de vapor y gotas. La medición de la calidad se hace con un calorímetro de vapor que requiere sólo una pequeña muestra del caudal del vapor.

Otras mediciones requeridas son las temperaturas del caudal del fluido de entrada y los voltajes de la energía eléctrica que entra al sistema.

1.2 Pérdidas de energía

Las pérdidas de energía calorífica del equipo de proceso al medio ambiente generalmente se efectúan por los mecanismos de radiación y convección.

La transferencia de calor por convección que tiene lugar a través de gases calientes en la superficie del material caliente, que son desplazados por gases más fríos, se puede analizar usando la ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{cr} A (T_s - T_0)$$

Dónde:

$$\frac{dQ}{dT} = \text{rapidez de pérdida de calor en unidades de energía} \left[\frac{J}{h} \right]$$

$$h_{cr} = \text{coeficiente de transferencia de calor} \left[\frac{J}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

$$A = \text{área de la superficie que pierde calor} \left[m^2 \right]$$

$$T_s = \text{temperatura de la superficie} \left[^\circ C \right]$$

$$T_0 = \text{temperatura ambiente} \left[^\circ C \right]$$

Aún cuando existen medidores de flujo de calor, generalmente es más fácil medir las cantidades indicadas arriba y derivar las pérdidas de calor de las ecuaciones. Los problemas que se encuentran al usar la ecuación están en la medición de temperaturas superficiales y en encontrar valores precisos para el coeficiente de transferencia de calor.

Desafortunadamente, la distribución de temperatura sobre la superficie de una unidad de proceso puede no ser uniforme, de manera que una estimación del promedio general puede resultar difícil, las técnicas por infrarrojo hacen más precisa esta determinación. El coeficiente de transferencia de calor no sólo es una fuerte función de las temperaturas de superficie y ambiente, sino que también depende de consideraciones geométricas y condiciones de superficie. Así pues, para temperaturas de superficie y de ambientes dadas, una placa vertical plana tendrá un valor h_{cr} diferente del que tendrá una placa horizontal o inclinada.

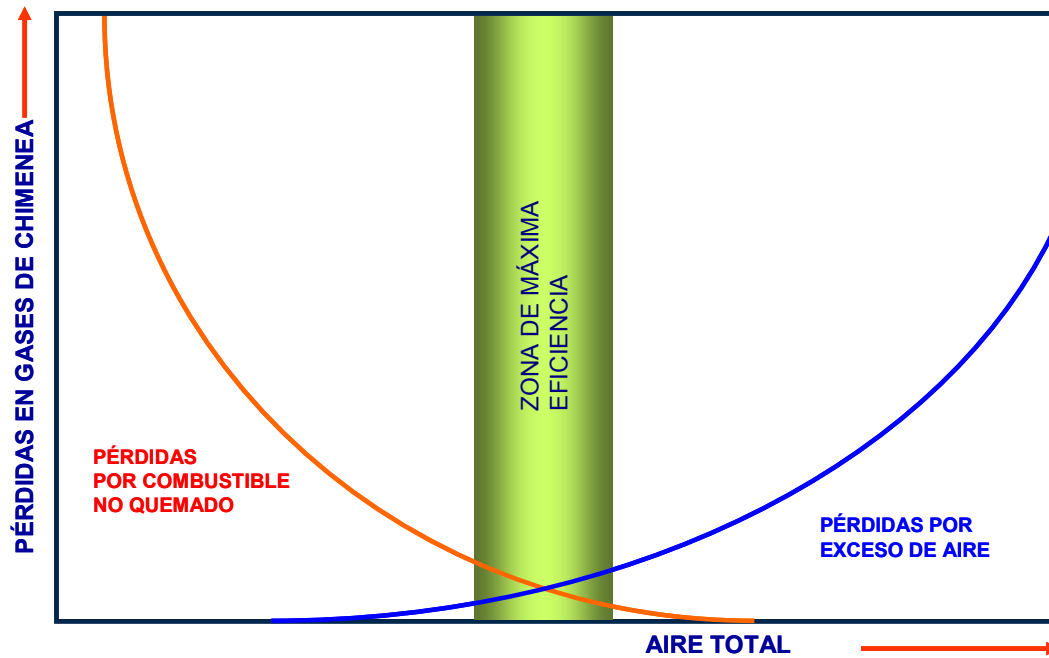
1.3 Descargas de energía

La composición, rapidez de descarga y temperatura de cada salida de la unidad de proceso son necesarias para completar el balance de energía. En el caso de la unidad que quema combustible sólo se requiere la composición de los productos de escape, la temperatura del gas producto de la combustión y el régimen de entrada de combustible para derivar:

- a. Gasto de entrada de aire
- b. Gasto del gas de escape
- c. Descarga de energía por la chimenea de escape.

La composición de los productos de escape se puede determinar por medio de una análisis Orsat, una prueba cromatográfica o, con una menor exactitud obteniendo la fracción volumétrica de oxígeno o CO₂, este último método se basa en el hecho de que las reacciones químicas ocurren guardando relaciones fijas de los reactivos para formar productos dados.

Generalmente, se suministra aire en exceso al combustible de manera que cada una de las moléculas de combustible reaccione con el número necesario de moléculas de oxígeno, aun cuando el proceso físico de mezcla sea imperfecto.



2 Poder Calorífico

Un buen comienzo para establecer el escenario ideal de una planta eficiente, es determinar cuánta energía se está entregando al sistema. Para expresar esta cantidad, en términos de combustible, se utilizan los términos Poder Calorífico Bruto (PCB) y Poder Calorífico Neto (PCN).

2.1 Poder calorífico bruto

Es la cantidad total de calor que se produce en la combustión.

En el Sistema Inglés, el PCB se define como la cantidad total de calor obtenida por la combustión de una cantidad específica de combustible a 60°F (42.22 °C), cuando inicia la combustión, y los productos de la combustión son enfriados a 60°F (42.22 °C) antes de que la cantidad de calor liberado sea medida.

2.2 Poder Calorífico Neto

Es la cantidad de calor que se produce en la combustión, con exclusión del calor no recuperable, por lo que equivale al calor del proceso de combustión que se aprovecha en la práctica. Para el carbón (sólidos) y los combustibles líquidos es 5% menor del PCB; para las diversas modalidades de gas natural y procesados es del 10%, mientras que en la electricidad no hay diferencia alguna entre el PCB y PCN.

El Balance Nacional de Energía presenta las estadísticas en términos del PCN, con el fin de que la información sea compatible con las prácticas de los organismos internacionales (Agencia Internacional de Energía, oficinas de estadísticas de las Naciones Unidas y Organización Latinoamericana de Energía).

Por razones prácticas, en las calderas los gases de combustión no son enfriados debajo de los 42.22 °C (60°F), debido a la posibilidad de que se forme ácido sulfúrico y cause problemas de corrosión severos. Por ello, la temperatura de los gases en chimenea se debe mantener arriba del nivel en que se puede formar el ácido, lo que implica un desperdicio de energía por esta causa.

Los poderes caloríficos de los combustibles se expresan como la relación entre la cantidad de energía contenida en la unidad de peso o de volumen del combustible de que se trate.

Poderes caloríficos netos					
Gas natural (promedio)	kJ/m^3	41,772	Gasolinas y naftas	MJ/bl	4,872
Gas natural asociado	kJ/m^3	44,077	Querosenos	MJ/bl	5,223
Gas natural no asociado	kJ/m^3	38,116	Diésel	MJ/bl	5,426
Carbón térmico	MJ/t	19,405	Combustóleo	MJ/bl	6,019
Carbón siderúrgico nacional	MJ/t	22,187	Gas seco	kJ/m^3	33,913
Gasolinas naturales	MJ/bl	4,781	Coque de carbón	MJ/t	26,521
Coque de petróleo	MJ/t	30,675	Leña	MJ/t	14,486
Gas licuado de petróleo	MJ/bl	3,765	Bagazo de caña	MJ/t	7,055

Fuente: Balance Nacional de Energía 2005, Sener
 kJ/m^3 : kilojoules por metro cúbico, MJ/t: megajoules por tonelada, MJ/bl: megajoules por barril, bl: barril de petróleo = 159 litros

3 Unidad de medida

La diversidad de unidades en las que se miden los energéticos (toneladas, barriles, pies cúbicos, BTU, litros, watts hora, entre otros) impide su comparación directa, por lo que es necesario adoptar una unidad común para las distintas fuentes de energía.

En el Balance Nacional de Energía se utiliza el joule (J) como unidad común, de acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. En dicha ley se establece que el Sistema General de Unidades de Medida es el único instrumento legal de uso obligatorio en los Estados Unidos Mexicanos. Allí se determina que la cantidad de calor y de energía debe medirse en joules.

3.1 Joule (J)

Es la cantidad de energía que se utiliza para mover un kilogramo masa a lo largo de una distancia de un metro, aplicando una aceleración de un metro por segundo al cuadrado.

3.2 Tabla de equivalencias

Equivalencias de energía

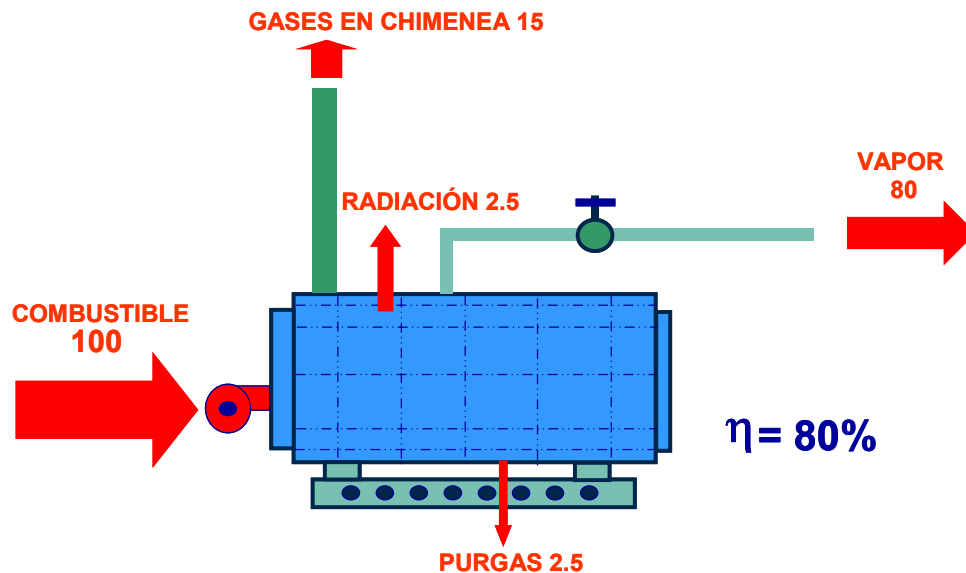
Para convertir									
De / a	caloría	Joule	termia	lb-pie	hp h	BTU	kWh	tep / neto	tec / neto
multiplique por:									
caloría	1	4.1868	1×10^{-6}	3.088	1.5596×10^{-6}	3.9683×10^{-3}	1.163×10^{-6}	100×10^{-12}	142.86×10^{-12}
Joule	0.2388	1	238.8×10^{-9}	0.7376	372.5×10^{-9}	947.78×10^{-6}	277.78×10^{-9}	23.88×10^{-12}	34.114×10^{-12}
termia	1×10^6	4.1868×10^6	1	3.088×10^{-6}	1.5596	3,968.3	1.163	100×10^{-6}	142.86×10^{-6}
libra-pie	0.3238	1.3558	323.8×10^{-9}	1	505.05×10^{-9}	1.2851×10^{-3}	376.62×10^{-9}	32.38×10^{-12}	46.257×10^{-12}
hp hora	64.1190×10^4	2.6845×10^6	0.64119	1.98×10^6	1	2,544.3	0.7457	6.4119×10^{-19}	9.1599×10^{-19}
BTU	251.99	1,055.1	251.9×10^{-6}	778.1	393×10^{-6}	1	293.07×10^{-6}	25.199×10^{-9}	35.986×10^{-9}
kWh	859.85×10^3	3.6×10^6	0.8599	2.656×10^6	1.341	3,412.1	1	85.985×10^{-6}	122.84×10^{-9}
tep / neto	10×10^9	41.868×10^9	10×10^3	30.88×10^9	15,596	39.683×10^6	11,630	1	1.42857
tec / neto	7×10^9	29.307×10^9	7,000	21.616×10^9	10,917	27.778×10^6	8,141	0.7	1
Otras unidades									
1 caloría termoquímica			= 4.184 J	1 quad = 10^{15} BTU					
1 caloría a 15°C			= 4.1855 J	1 Watt = 1 J/seg					
1 erg			= 10^{-7} J	1 caloría grande (kcal) = 1,000 cal					
1 caballo potencia métrico (cvh o PS)			= 0.9863 hp	1 kilowatt = 1.3596 cvh					
1 therm (Inglés)			= 10^5 BTU						

4 Eficiencia

El proceso para calcular la eficiencia comienza con la determinación, lo más precisa posible, de la cantidad de energía que entra al proceso. Para esto, es necesario conocer cuánto combustible se está quemando y su poder calorífico (PCB), es decir, cuántos joules se suministran por cada kilogramo o metro cúbico de combustible.

La eficiencia de la caldera es el porcentaje de la energía contenida en el combustible alimentado (energía que entra a la caldera) que sale en el vapor producido (energía convertida en vapor o aprovechada)

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía suministrada}}$$



Esta eficiencia es llamada también eficiencia combustible / vapor.

4.1 Limitaciones

La eficiencia de una caldera está limitada, entre otros factores, por la temperatura de rocío ácido y el exceso de aire necesario.

El punto de rocío ácido es la temperatura de los gases de combustión en la cual se empieza a condensar ácido sulfúrico (y/o otros ácidos) en la chimenea de la caldera. Este fenómeno, debido al contenido de azufre en algunos combustibles, no permite que se pueda recuperar todo el calor suministrado por el combustible y que sale con los gases de combustión.

También, debido a que se necesita suministrar más aire que el requerido teóricamente para la combustión completa del combustible, aumenta el volumen de gases de combustión que salen por la chimenea, acarreado una cantidad mayor de calor.

5 Vapor de agua

El vapor de agua tiene la propiedad de poder acumular una gran cantidad de energía térmica; además, ofrece la ventaja de fluir automáticamente al punto de uso sin necesidad de ser bombeado. Se mueve a través del sistema de tuberías hacia los puntos de baja presión, donde el vapor se condensa y cede el calor latente.

5.1 Propiedades del vapor

El vapor de agua tiene tres propiedades que podemos poner a trabajar en nuestro beneficio: presión, temperatura y volumen.

La presión y volumen se combinan para mover maquinaria (pistones y turbinas) y la temperatura se utiliza en todos los procesos donde se aprovecha el calor (intercambiadores, tanques de calentamiento).

Para la conversión de agua, desde su fase líquida hasta su fase vapor, se debe suministrar calor para elevar su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición.

El agua, cuando se calienta a una presión constante, sufrirá un aumento en su temperatura hasta cierto valor en el que se empezará a evaporar o hervir. La temperatura a la que el agua hierve se conoce como temperatura de saturación y depende de la presión a la que se calienta el agua. Si se aumenta la presión, aumenta también la temperatura de saturación; si la presión disminuye, la temperatura de saturación baja. Para cada valor de presión corresponde un valor de la temperatura de saturación. La temperatura del agua y del vapor permanece constante para cada valor de presión.

5.2 Calor sensible

Es un aumento medible en la temperatura del agua antes de que comience a hervir, es decir, es el incremento que indica el termómetro. Es aproximadamente 4.18 joules por gramo de agua por cada grado de aumento en la temperatura (1 caloría por gramo de agua por cada grado centígrado de aumento en la temperatura).

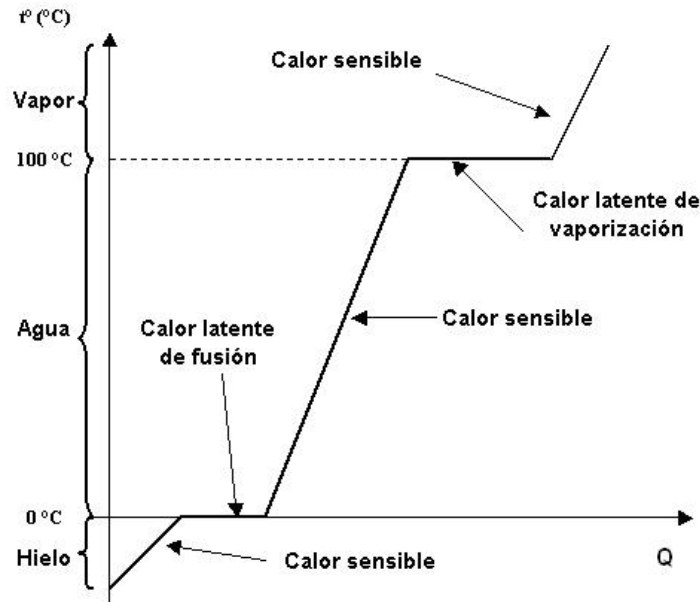
5.3 Calor latente de evaporación

Cuando el agua alcanza su punto de ebullición, ocurre un cambio importante: el agua comienza a evaporarse sin cambio en su temperatura. Este cambio de fase de líquido a vapor absorbe energía conocida como “Calor latente de evaporación”.

Cuando el vapor no está totalmente vaporizado, se le llama “vapor húmedo” y el peso del contenido de agua, en forma de pequeñas gotas en el vapor, comparado con el peso de éste se conoce como “porcentaje de humedad” o “calidad del vapor”. De igual manera, cuando se extrae calor del vapor saturado, se produce condensación, creando vapor húmedo. Existe una gran dificultad para obtener exactamente vapor seco y saturado.

Cuando el vapor es calentado por arriba de la temperatura de saturación, es llamado “vapor sobrecalentado” (o supercalentado). Este vapor es seco, no contiene gotas de agua y puede estar a cualquier temperatura por arriba de la de saturación. Esto se realiza por lo general aplicando calor al vapor después de haberlo retirado del contacto con el agua.

Este fenómeno también se presenta cuando al vapor se le reduce la presión, mediante una válvula reductora de presión (VRP) en la línea de distribución de vapor.



5.4 Determinación del calor en el vapor y el agua

El contenido de calor del agua o del vapor se expresa en Joules por kilogramo (J/kg) y se conoce como entalpía, representada por (h) en tablas y fórmulas.

Las “tablas de vapor” contienen la información básica sobre las propiedades energéticas del vapor.

Entalpía del líquido saturado (h_f) es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de un kilogramo de agua de 0 °C a la temperatura de saturación. A esta propiedad se le llama también “calor sensible” o “calor del líquido”.

Entalpía de evaporación (h_{fg}) es la cantidad de calor requerido para transformar un kilogramo de agua a la temperatura de saturación, en vapor seco y saturado a la misma temperatura. También se le llama “calor latente de vaporización”.

Entalpía del vapor saturado (h_g) es el calor requerido para cambiar un kilogramo de agua a 0 °C en vapor seco y saturado. Es la suma de las entalpías de líquido saturado y de evaporación. También se conoce como “calor total del vapor”.

5.5 Propiedades del vapor de agua

Presión absoluta kg/cm ²	Temperatura de saturación °C	Volumen específico (vapor) m ³ /kg	Entalpía de líquido (hf) kJ/kg	Entalpía de evaporación (hfg) kJ/kg	Entalpía total (hg) kJ/kg
1	99	1.691	414.91	2672.85	3087.76
2	119.5	0.883	501.57	2703.00	3204.57
3	132.9	0.604	558.52	2721.84	3280.36
4	143	0.461	601.64	2735.66	3337.3
5	151.2	0.374	636.81	2746.12	3382.93
6	158.1	0.315	666.96	2754.08	3421.04
7	164.1	0.272	692.92	2761.19	3454.11
8	169.6	0.240	717.20	2767.06	3484.26
9	174.5	0.215	738.55	2772.08	3510.63
10	179	0.194	758.23	2776.69	3534.92
11	183.1	0.177	776.65	2780.45	3557.10
12	187.1	0.163	794.24	2783.80	3578.04
13	190.7	0.151	810.56	2786.73	3597.29
14	194.1	0.141	825.64	2789.25	3614.89
15	197.3	0.132	839.87	2791.76	3631.63
20	211.4	0.100	903.93	2800.13	3704.06
24	220.8	0.0833	947.05	2803.48	3750.53
28	229	0.0715	985.57	2805.16	3790.73
32	236.3	0.0625	1020.32	2805.20	3825.52
36	243	0.554	1052.56	2804.74	3857.30
40	249.2	0.0497	1082.29	2802.64	3884.93
44	254.9	0.0451	1109.92	2800.55	3910.47
48	260.2	0.0411	1136.30	2797.20	3933.50
50	262.6	0.0394	1148.86	2795.53	3944.39

Fuente: Manual de eficiencia Térmica en la Industria.- CADEM, Bilbao, España
Presión absoluta = Presión manométrica + Presión atmosférica

Estos datos se utilizan para calcular la cantidad de energía que entra o sale de los sistemas de vapor. Las tablas de vapor también nos muestran los cambios que sufre la temperatura de saturación con los cambios de presión. A presión atmosférica (nivel del mar) el agua hierve a 100 °C, mientras que a una presión de 20 kg/cm², hierve a 211 °C. La temperatura de trabajo del vapor se eleva al aumentar la presión.

6 Recuperación de calor del sistema de condensados

El calentamiento del agua que se va a alimentar a la caldera utiliza un alto porcentaje de la energía total que se encuentra en el vapor; por ello, es necesario recordar la siguiente regla: se deben regresar los condensados al sistema a la mayor temperatura posible.

El agua de alimentación a la caldera se debe calentar hasta su punto de ebullición para eliminar oxígeno (O) y bióxido de carbono (CO₂), que pueden causar corrosión y daño severo a la caldera y a las tuberías del sistema.

A mayor temperatura se regresen los condensados al sistema, se obtendrá mayor eficiencia. Por cada 6 °C de temperatura que se deben añadir al agua de alimentación, se reduce la eficiencia del sistema en 1%.

Supongamos que el agua de alimentación entra a 10 °C al tanque de calentamiento y que se eleva su temperatura hasta 100 °C, dependiendo del tipo del sistema, para inyectarla a la caldera. Para esto se necesita una kilocaloría por kilogramo de agua y por grado centígrado; en este caso 90 kilocalorías o 377.1 kilojoules por cada kilogramo de agua. Esto representa 15% de la energía contenida en el vapor.

Desafortunadamente, existe otra razón por la que el condensado puede regresar al cuarto de caldera muy caliente; esto es un signo claro de que una o varias trampas de vapor no están funcionando correctamente.

En sistemas de vapor que no han recibido mantenimiento por más de tres o cinco años, suele ocurrir que el 15% y hasta el 30% de las trampas de vapor estén "atascadas"; algunas de éstas pueden estar en posición abierta y, por lo tanto, permitirán el escape de vapor vivo al sistema de retorno de condensado. En los sistemas de vapor sujetos a un programa de mantenimiento, el número de trampas abiertas no debe superar el 5% del total. Si su sistema cuenta con varias trampas, una revisión de su funcionamiento probablemente detectará pérdidas de vapor significativas.

Intervalos de revisión recomendados:

- Sistemas de alta presión (más de 10 kg/cm²).- Semanal o mensual
- Sistemas de presión media (de 2 a 10 kg/cm²).- Mensual o trimestral
- Sistemas de baja presión (menos de 2 kg/cm²).- Anual

Ejemplo:

Al hacer la revisión en una planta que trabaja continuamente y donde el costo del vapor es de \$100.00 por tonelada (0.1 \$/kg), se encontró que en una línea de vapor a 10.5 kg/cm² se ha quedado atascada una trampa en posición abierta, que tiene un orificio de 3.2 mm de diámetro. La tabla muestra una pérdida estimada de vapor de 34.45 kg/hr; el ahorro anual por la reparación de la trampa será:

$$Ahorro = 34.45 \frac{kg}{h} \times 8760 \frac{h}{año} \times 100 \frac{\$}{Ton} \times \frac{1Ton}{1000kg} = 30178.20 \frac{\$}{año}$$

Descarga de vapor en trampas abiertas				
Diámetro del orificio de la trampa (mm)	Pérdida de vapor (kg vapor/hora)			
	Presión del vapor (kg/cm ²)			
	1.05	7.04	10.56	21.12
0.79	0.38	1.50	2.18	
1.58	1.54	6.00	8.59	16.45
3.17	6.23	24.00	34.45	65.91
4.76	13.95	54.09	77.27	148.18
6.35	24.86	95.90	137.72	263.18
9.52	55.91	215.90	310.00	592.27

Revisión de trampas de vapor

Las trampas de vapor se revisan para determinar si están funcionando adecuadamente y no se han quedado atascadas, ya sea cerradas o en posición abierta; en este último caso, permiten que el vapor vivo escape hacia el sistema de retorno de condensado. Existen cuatro formas básicas para revisar el funcionamiento de las trampas: por temperatura, sonido, visualmente y electrónicamente.

Se sugiere el establecimiento de un programa de revisión para detectar oportunamente las trampas que fallan y poder repararlas. Elabore un formato de reporte para asegurar la cobertura de todas las trampas y establezca un mecanismo que documente los ahorros de energía y económicos.

7 Ahorros

Cálculo de los ahorros de combustible y pérdidas basados en la variación de la eficiencia.

Existe una diferencia importante entre mejora de la eficiencia y ahorro de combustible. Un incremento de la eficiencia de 80 a 81% es una mejora de 1% en la eficiencia, sin embargo, como el incremento es proporcional ($1/80 \% = 1.25$), representa un 1.25% de ahorro en combustible.

El porcentaje en ahorro de combustible siempre es mayor que el incremento en eficiencia. De igual manera, el porcentaje de pérdida en los ahorros de combustible siempre es mayor que el porcentaje de reducción de la eficiencia.

La fórmula para calcular los ahorros de combustible o sus pérdidas, derivadas de un cambio en eficiencia es:

Ahorros = (eficiencia nueva – eficiencia anterior) / eficiencia nueva

El costo / beneficio por mantener la eficiencia de la caldera a un nivel alto se calcula fácilmente con la fórmula siguiente:

$$A = C \times \frac{E_a - E_i}{E_a} \times C_c \times H_a$$

Donde:

A = ahorro potencial anual en combustible

C = consumo de energía promedio en millones de joules por hora

E_i = eficiencia ideal

E_a = eficiencia actual o nueva

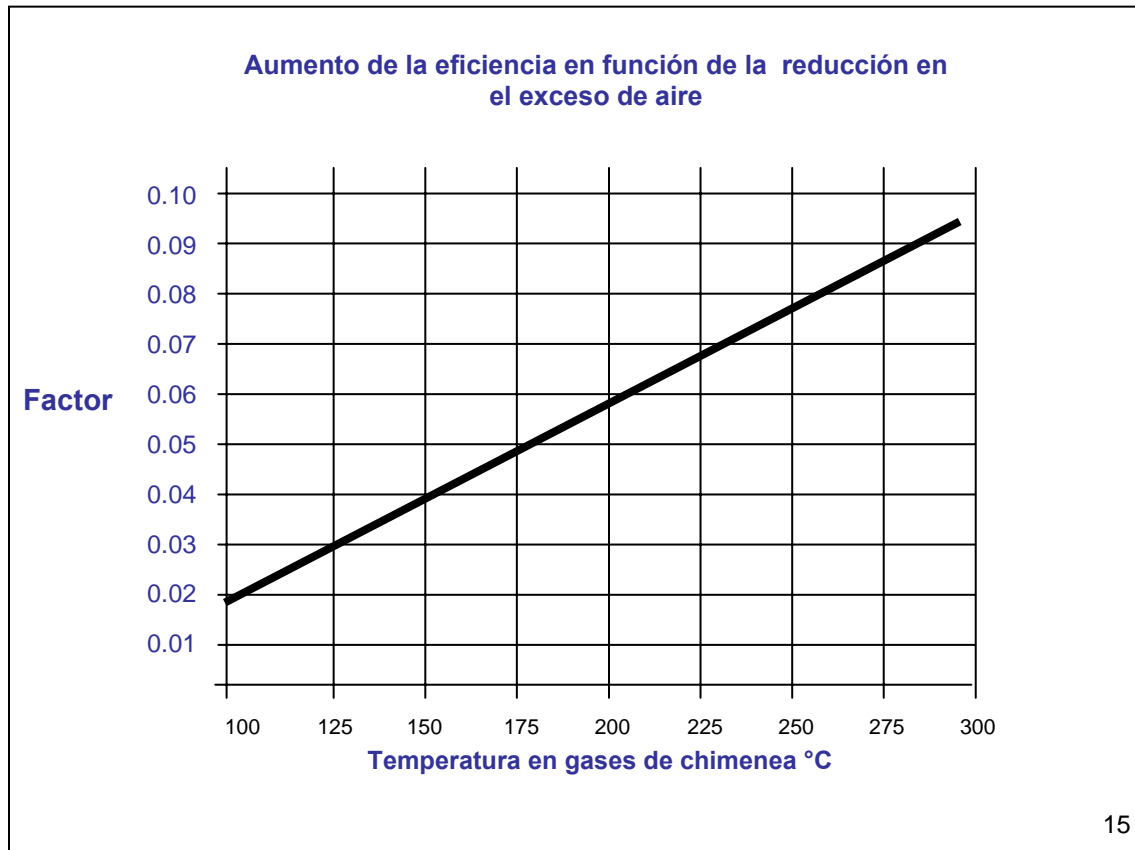
C_c = costo del combustible por millón de joules

H_a = horas de operación anual

La eficiencia de las calderas varía con la carga, y el potencial de ahorro en el combustible cambiará también, dependiendo de la carga para la cual se tiene la eficiencia de referencia.

7.1 Temperatura de gases en chimenea y exceso de aire

Conviene tener una forma rápida para estimar el potencial de ahorro en combustible en función de la temperatura de los gases de chimenea o del exceso de aire de combustión. El siguiente gráfico permite hacer esta estimación.



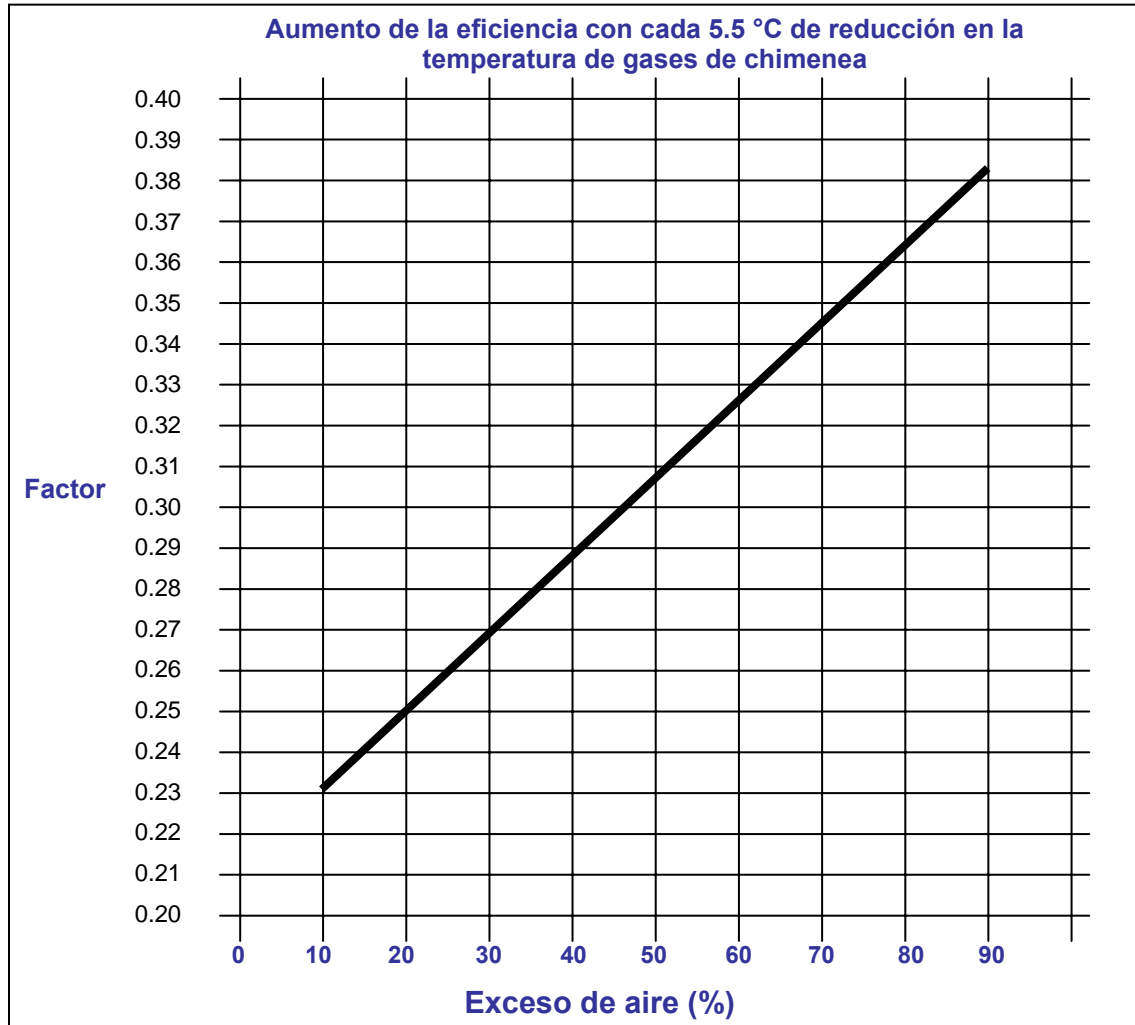
Variación de la eficiencia (%) por cada 1% de variación en el exceso de aire para varias temperaturas de gases de chimenea.

La mejora en la eficiencia por cada 1% de cambio en el exceso de aire varía con la temperatura de los gases de la chimenea. Para estimar el cambio en eficiencia, multiplique el factor a la izquierda que corresponda con la temperatura de gases por el cambio en el exceso de aire.

Ejemplo:

¿Cuál será el cambio en la eficiencia con una temperatura de gases de 250 °C, si el exceso de aire se reduce en un 50%?

El factor para 250 °C es, aproximadamente, de 0.077, que multiplicado por la reducción del 50% de exceso de aire, nos da una mejora en la eficiencia de 3.85 %.



La mejora de la eficiencia por cada 5.5 °C de cambio en la temperatura de los gases de chimenea varía con la cantidad de exceso de aire. Para estimar el cambio en eficiencia, multiplique el factor a la izquierda de la gráfica que corresponda al nivel de exceso de aire por cada 5.5°C de cambio en la temperatura de chimenea.

Ejemplo:

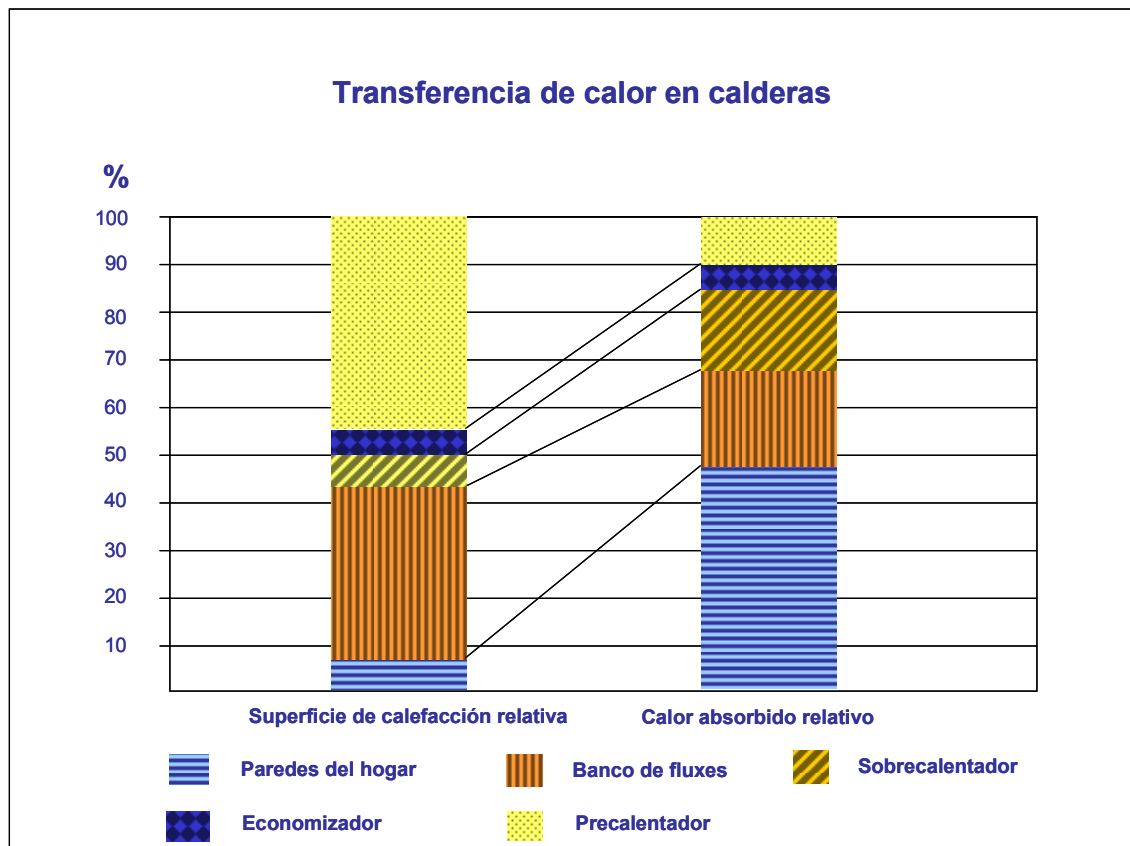
¿Cuál será el cambio en eficiencia con un nivel de exceso de aire del 60%, si la temperatura en la chimenea se reduce en 55.55 °C?

El factor a 60% de exceso de aire es 0.325, que multiplicado por $55.55 / 5.5 (= 10.10)$, nos da $10.10 \times 0.325 = 3.28$ % de mejora en la eficiencia.

7.2 Mejora de la transferencia de calor radiante

La sección de radiación de la caldera expuesta directamente a la radiación de la combustión, es la zona de transferencia de calor más efectiva de la caldera.

En la siguiente figura se muestra que el 8% de la superficie de calefacción absorbe aproximadamente el 48% de la energía de la combustión. La sección de convección, que comprende el 34% de la superficie de calefacción, solo absorbe aproximadamente el 20 % del calor de combustión.



7.3 Temperatura de flama

Conforme el exceso de aire se reduce, la temperatura de flama aumenta. Las temperaturas de flama son bastante complejas de analizar pero, en general, se puede decir que para gas natural con 0 % de exceso de aire, la temperatura de flama es de unos 1760 °C y que a 100% de exceso de aire ésta cae hasta aproximadamente 1260 °C. Para el combustóleo, estas cifras son 2300 °C con 0% de exceso de aire y 1320 °C a 100% de exceso de aire.

A mayor temperatura de flama, la transferencia de calor por radiación es más intensa; por lo mismo, si la temperatura en la sección de radiación de la caldera se reduce por bajar la temperatura de flama, habrá una menor transferencia de calor por radiación. Finalmente, esto ocasionará un aumento en la temperatura de gases en la chimenea, debido a

que parte del calor del combustible no se aprovechó en esta zona y sale con los gases de combustión, reduciendo la eficiencia.

Debido a este fenómeno, se han notado variaciones en la temperatura de chimenea hasta de 28 °C. Los cambios en el exceso de aire afectan directamente la temperatura de flama y la transferencia de calor en la zona de combustión y radiación.

8 Referencias:

Boiler Plant and Distribution System Optimization Manual.- Harry R. Taplin

Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria.- CADEM.- Bilbao, España

Guía para el aprovechamiento del calor de desperdicio, Kenneth G. Kreider & Michael B. McNeil, USA

Balance Nacional de Energía.- SENER.- México