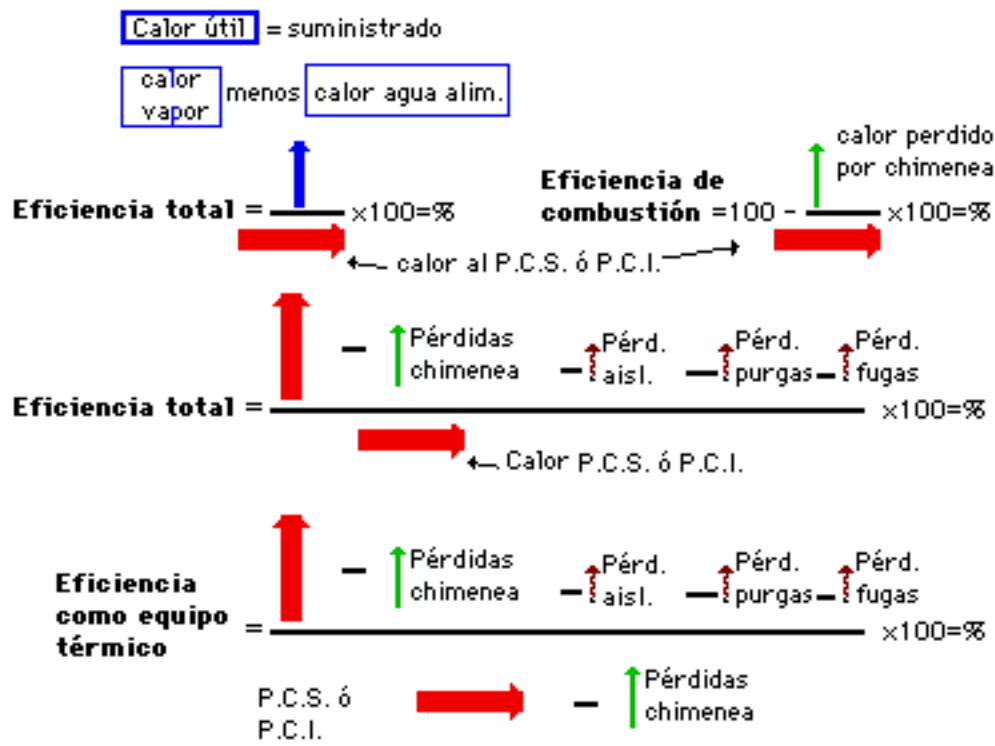
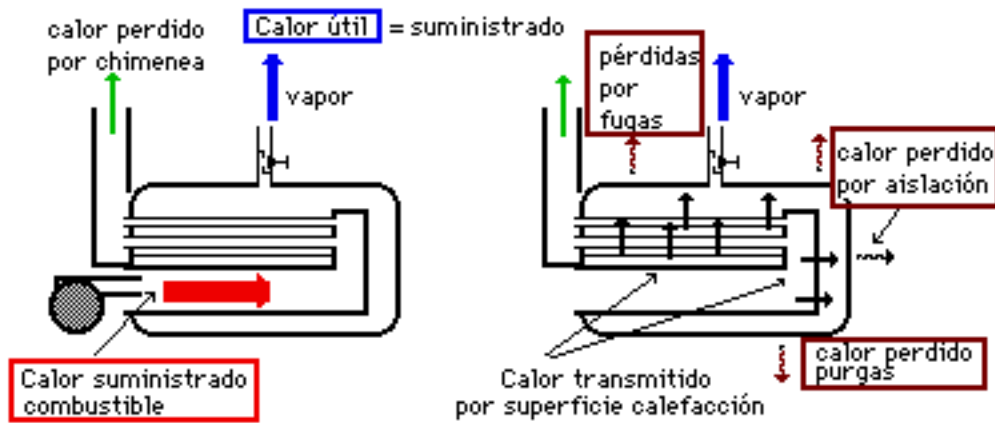


**EFICIENCIA EN CALDERAS**



**EFICIENCIA EN CALDERAS****PODER CALORIFICO DE LOS COMBUSTIBLES. (valores aprox.)**

FUEL OIL .....	P.C.S. ....	10.300	Kcal/Kg.
	P.C.I. ....	9.700	Kcal./Kg.
<b>Leña</b> (Varía de acuerdo a la humedad de la leña). Eucaliptos en rollos.			
Humedad 41%.....	P.C.S.....	2.764	Kcal./Kg.
(2 meses).			
	P.C.I.....	2.296	Kcal./Kg.
Humedad 35%.....	P.C.S.....	3.045	Kcal./Kg.
(3 a 4 meses).			
	P.C.I.....	2.590	Kcal./Kg.
Humedad 30%.....	P.C.S.....	3.280	Kcal./Kg.
(4 a 6 meses)			
	P.C.I.....	2.836	Kcal./Kg.
Humedad 25%.....	P.C.S.....	3.510	Kcal./Kg.
(más de 6 meses)			
	P.C.I.....	3.081	Kcal. /Kg.
Humedad 0 % .....	P.C.S.....	4.685	Kcal./Kg.
(No real práctica).			
	P.C.I.....	4.308	Kcal./Kg.
Supergas.....	P.C.S.....	12.800	Kcal./Kg.
	P.C.I.....	11.800	Kcal./Kg.
Gas natural .....	P.C.S.....	12.290	Kcal./Kg.
	P.C.I.....	11.100	Kcal./Kg.

Cada combustible tiene su Poder Calorífico (P.C.S. y P.C.I.) de acuerdo a su composición química, el cual se utilizará para el cálculo de la Eficiencia de una caldera, que podrá variar un poco según su procedencia.

**MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA :**

Como ya dijimos, la Eficiencia es el % de calor suministrado al vapor (o aprovechado en el vapor) del calor total que es capaz de suministrar el combustible (teniendo en cuenta que hay dos formas para calcular el calor capaz de suministrar el combustible, según usemos el P.C.S. ó P.C.I.).

Hay 2 métodos para el cálculo de la Eficiencia : a\_ Método directo, b\_ Método indirecto.

**a\_ Método directo :** Consiste en la medición del caudal de vapor por hora, que conociendo su presión y temperatura (si es vapor saturado, puede contener humedad que debería ser tenida en cuenta, a efectos prácticos lo dejaremos de lado : supondremos que el vapor sea seco : título 100%) buscamos en una tabla de vapor y podremos saber la cantidad de calor que es capaz transportar. **Restándole el calor suministrado por el agua de alimentación** (por su temperatura), obtendremos la cantidad de **calor total suministrado al vapor por el combustible en la caldera** .

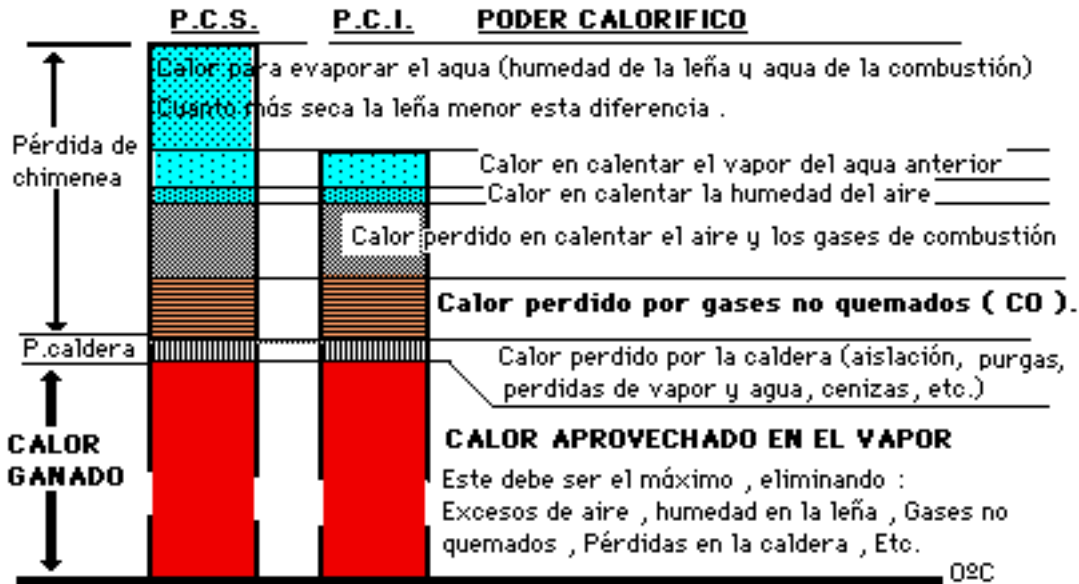
Conociendo los Kgs. de combustible y su respectivo Poder Calorífico (sea el P.C.S. o P.C.I. según se desee calcular la Eficiencia), podemos saber el calor capaz de ser suministrado por el combustible.

Todos estos valores de calor (en Kilo-Calorías) están referidos a 0° grado centígrado (o sea, es el calor que podemos extraer de dichos fluidos o combustibles cuando son enfriados hasta 0° grado centígrado y 760 mm. de mercurio de presión absoluta- presión atmosférica estandar).

**EFICIENCIA EN CALDERAS**

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Kgs.vapor/h} \times (\text{Kcal./ Kg.vapor}-\text{Kcal./ Kg. agua}) \times 100}{\text{Kgs. combustible/h} \times \text{Poder Calorífico Kcal./ Kg.}}$$

Referirla al P.C.S. ó P.C.I.



Ejemplo :

Una caldera que produce 1.200 Kg. /hora de vapor a 8 Kg/cm2 de presión de vapor saturado, seco, con un agua de alimentación a 24 °C., quema por hora 328 Kg. de leña en rollos con 35% de humedad. Veamos las Eficiencias al P.C.S. y al P.C.I.

Datos de tablas :

Vapor a 8 Kg./cm2 saturado: Calor 659 Kcal/kg.....Agua de alimentación a 24°C..24 Kcal/kg.

Leña a 35% Humedad.... P.C.S. 3.045 Kcal./Kg.....P.C.I.....2590 Kcal./Kg.

Cálculos :

$$\text{Eficiencia al P.C.S.} = \frac{1.200 \times (659-24) \times 100}{328 \times 3.045} = 76,2\%$$

$$\text{Eficiencia al P.C.I.} = \frac{1.200 \times (659 -24) \times 100}{328 \times 2.590} = 89.7 \%$$

Como se vé, los valores son distintos, lo que hace muy importante cuando se habla de Eficiencia en calderas, saber a que Poder Calorífico esta referido.

Veamos este mismo ejemplo, pero utilizando leña más seca, de 25 % de humedad, cuyo Poderes Calorificos son : P.C.S. 3510 Kcal. /kg. y el P.C.I. 3.081 Kcal./kg. y que por quemar leña más seca quema menos por hora : 268 Kg./hora.

$$\text{Eficiencia P.C.S.} = \frac{1.200 \times (659-24) \times 100}{268 \times 3.510} = 81\%$$

$$\text{Eficiencia P.C.I.} = \frac{1.200 \times (659-24) \times 100}{268 \times 3.081} = 92.2\%$$

Como se ve las Eficiencias al P.C.S. variaron de 76,2% a 81% o sea 4.8% , las Eficiencias al P.C.I.

variaron del 83,7% al 86,4% o sea 2,6%.

Siendo la caldera la misma, en las mismas condiciones de operación (en la práctica hay variación en las pérdidas por chimenea debido a las condiciones de combustión distinta por el tenor de humedad).

Pero como se nota, la menor variación en la Eficiencia es la relativa al P.C.I., por lo cual se hace más interesante para la comparación de las calderas, ya que no es afectada en forma dramática por la humedad del combustible o su contenido de hidrógeno (que al entrar en combustión con el oxígeno forma agua).

En algunos Países se utiliza esta Eficiencia referida al P.C.I., ya que permite comparar las calderas entre sí.

En otros Países se utiliza la Eficiencia referida al P.C.S., esta es ideal cuando se desean comparar distintas condiciones del combustible o combustibles distintos en una misma caldera.

En Uruguay se comenzó utilizando la Eficiencia respecto al P.C.S., pero en la actualidad se utiliza con más frecuencia la Eficiencia respecto al P.C.I. (Probablemente esto se deba a la influencia Europea con las calderas a leña).

La medición del caudal de vapor se hace por medio de caudalímetros de placa de orificio u otro sistema. A veces midiendo el consumo de agua de alimentación (por caudalímetros o por tanques según baje el nivel de agua), descontando las purgas que se efectúen. La presión y la temperatura del vapor, como así la temperatura del agua de alimentación deben ser medidas con instrumentos que estén en condiciones. Las tablas de vapor se sacan normalmente de los libros que tratan el tema de vapor, teniendo en cuenta que la presión podrá ser absoluta y la del manómetro normalmente relativa (cuidando de convertir correctamente el tipo de unidades a que esta referida la tabla y el manómetro : Kg/cm<sup>2</sup>, libras por pulgada cuadrada, bar, etc.)

El poder calorífico se saca normalmente de la información técnica (ya que el mismo se mide en un laboratorio en un obús calorimétrico), pero debe tenerse mucho cuidado con la humedad y más en el caso de la leña que es muy importante. Los Kilos de combustible, sea líquido o sólido también debe ser cuidadosamente medidos.

El método directo de medición de Eficiencia tiene la ventaja de dar un valor real de la misma si se han tomado correctamente los valores para el cálculo, ya que no solo se esta teniendo en cuenta la pérdida por gases en chimenea, sino que se tienen en cuenta las pérdidas propias de la caldera (calor que escapa a la atmósfera por la envuelta de la caldera, así como las pérdidas de vapor y agua, combustible sin quemar, etc).

Este método directo tiene el inconveniente de que para efectuarlo requiere tiempo (24 horas como mínimo) y si queremos repetirlo (cosa conveniente), más tiempo. Generalmente las plantas no tienen un instrumental instalado permanente, lo cual hace difícil ejecutarlo. Puede haber confusiones si no se puede medir el vapor correctamente (cosa que no es fácil) debido a que si medimos el agua de alimentación debemos de tener en cuenta las pérdidas de agua y vapor (así como las purgas necesarias). La calidad del vapor (humedad, "título", etc.) requiere un calorímetro de vapor, pero si el % carga de la caldera menos del 80% y el T.S. Disueltos, PH, alcalinidad, T.S. en suspensión están por debajo de los límites aconsejable para una buena calidad de vapor, la humedad del vapor a la salida de la caldera generalmente es despreciable : título mayor al 99%.

#### **b - Método indirecto :**

Como la cantidad de calor que es suministrado al vapor es igual al calor suministrado por el combustible menos los calores perdidos (calor perdido en los gases de chimenea, calor perdido por el cuerpo de la caldera, calor perdido en pérdidas de vapor y agua, en las cenizas del combustible).

Midiendo el exceso de aire para calcular el volumen de gases por Kg. de combustible y su temperatura, podemos calcular la pérdida más importante: el calor perdido en los gases de chimenea.

Este método tiene la ventaja que es más fácil de utilizar cuando no se disponen de mayores elementos de medición.

La otras pérdidas : pérdida de calor por el cuerpo de la caldera, pérdida por vapor y agua, pérdida por combustible en la cenizas, deben de ser estimadas, lo cual hace de este método una medición no muy exacta en forma global, pero tiene la gran virtud de poder controlar la combustión y transferencia por la

pérdida directamente medida en los gases y poder corregir la misma.

Una vez de construida la caldera, la pérdida en los gases de chimenea es la única que tiene un valor muy importante y que varía continuamente, no así las otras que son controlables, pero no varían en forma continua (ya que la aislación es mejorable hasta cierto punto, las pérdidas de vapor y agua son visibles, el combustible sin quemar como ceniza también lo es).

**Veremos que la Eficiencia a la Combustión (y Transferencia)**, que en realidad involucra a la combustión en sí misma y la transferencia de calor hacia la caldera, es relativamente fácil de medir, muy rápido cualquiera de sus métodos y tienen una utilización directa: corregir la combustión en el momento y permite juzgar las superficies de transferencia de la caldera (si están sucias de hollín del lado "fuegos" o si están incrustadas del lado "agua").

**Veamos como se obtiene :**

La combustión se produce cuando el combustible entra en contacto con el oxígeno del aire, pero para que ello ocurra debe de haber una temperatura determinada y el combustible encontrarse en contacto íntimo con el oxígeno del aire, un tiempo hasta completar su combustión.

Cada combustible necesita una determinada cantidad de aire por cada Kg. de combustible, así tenemos que:

**Cantidad de aire mínimo o aire estequiométrico**

La leña con 35% de humedad necesita de ....4,16 Kg. de aire por cada Kg. de leña.

La leña con 27% de humedad necesita de ....4,87 Kg. de aire por cada Kg. de leña.

El F.Oil.....13,22 Kg. de aire por cada Kg. de F.Oil.

El Super-gas.....15,7 Kg. de aire por cada Kg. de Super -gas

El gas natural.....16,3 Kg. de aire por cada Kg. de gas natural.

La cáscara de arroz 0% de humedad .....4,850 Kg. de aire por cada Kg. de cáscara.

La cáscara de arroz 10% de humedad .....4,360Kg. de aire por cada Kg. de cáscara.

Pero este es el aire mínimo, como es muy difícil que se pueda encontrar cada pequeña partícula de combustible con el oxígeno que necesita, es necesario un exceso de aire.

**Este exceso de aire depende del tipo de combustible, del tipo de hogar, de las condiciones que opera la caldera,** etc. pero se debe de tratar que sea el exceso lo más pequeño posible, ya que el aire que no suministra oxígeno (es decir el aire que entra y su oxígeno no es consumido) es calentado por el calor de combustión en el interior del hogar y sale con mayor temperatura que la que entró, llevándose el calor de la combustión innecesariamente.

Ejemplo : Una caldera quemando F.Oil con un exceso de aire necesario del 20%, se encuentra con un exceso del 50%, cuando quema 200 Kg. F.Oil por hora, esto significa un aumento en la pérdida de calor en la chimenea por el calentamiento de este 30% más de aire. Si suponemos que la temperatura del aire de la sala es de 20°C y la de los gases en chimenea es de 280 °C.

Por 1 Kg. de F.Oil es necesario de aire mínimo .....=13,22 Kg. /Kg.

Por 1 Kg. de F.Oil con un exceso de aire de 20% (1,2 veces)...13,22x1,2=15,86 Kg./Kg.

Por 1 Kg. de F.Oil con un exceso de aire del 50%(1,5 veces)... 13,22x1,5=19,83 Kg./Kg.

Aire excesivo para la combustión.....(de 1,2 a 1,5).....= 3,97 Kg./Kg.

Considerando 200 Kg. de combustible hora 3,97x200=794 Kg. de aire por hora innecesario.

Por cada grado centígrado de calentamiento de 1 kg. se necesita aproximadamente 0,24 Kcal/Kg.

Esto significa que al calentar 794 Kg. de aire de 20°C a 200°C se necesitan en Kilo-calorías

**794 x (200 - 20) x 0,24 = 34.300 Kcal/hora, considerando que cada Kg. de F.Oil nos puede suministrar 9700 Kcal/ Kg. 34.300/9700= 3,53 Kg.F.Oil/h.**

Es decir, estamos gastando innecesariamente 3,53 Kg. de F.Oil por hora para calentar ese aire que no nos aporta calor al vapor.

### **EXCESO DE AIRE**

El exceso de aire en forma practica lo controlamos observando los humos de la caldera, en el caso del F.Oil cuando vemos humo negro decimos que falta aire, carmelita: correcto, transparente: aire en exceso, blancos: excesivo.

En la leña (en gases también) la observación de los humos no es una medida muy exacta de lo que esta ocurriendo, ya que la combustión no es tan definida (entre falta de aire y exceso), sino que hay una zona intermedia en la que se produce una combustión no completa

**EFICIENCIA EN CALDERAS**

(monóxido de carbono CO), que produce una pérdida importantísima, ya que es combustible sin quemar (aún habiendo exceso de aire puede haber pérdidas por CO, por cada 1% CO en los gases se produce una pérdida cercana al 5-7% )..

En el caso de los gases, el problema de se agrava, ya que no se producen humos con mala combustión, y el color de la llama no es muy notorio para observar si quema bien.

Para controlar el exceso de aire se utilizan cálculos o tablas basadas en la medición del exceso de oxígeno (O<sup>2</sup>) o el % de anhídrido carbónico (CO<sup>2</sup>) en los gases de chimenea.

Es más fácil medir el anhídrido carbónico desde el punto de los instrumentos, pero pudiéndose medir el oxígeno resulta más exacto. La medición es en %, generalmente referido a los gases no condensables (es decir secos).

En leña y gases en general es importantísimo medir el monóxido de carbono para verificar si la combustión es completa, de lo contrario la medida carece de valor.

Cada combustible tiene un máximo de anhídrido carbónico en % (CO<sub>2</sub>) que corresponde al aire mínimo, donde el oxígeno esta totalmente consumido 0% :

CO<sub>2</sub> máximo para el F.Oil.....16 -16.7%

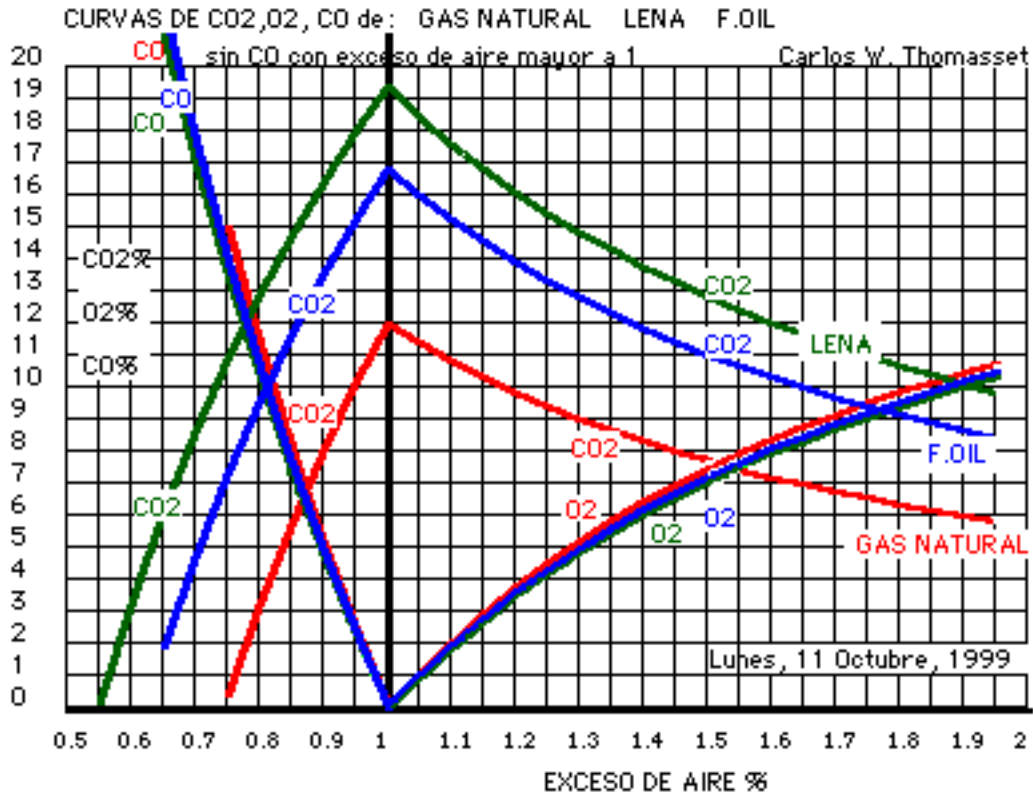
CO<sub>2</sub> máximo para la leña.....19,4-20,5%

CO<sub>2</sub> máximo para super-gas.....13,8-14%

CO<sub>2</sub> máximo para gas natural....11,0-11,8%

Los valores intermedios (ente 0% y estos máximos) responden a una curva que varía con el exceso de aire, por lo que se hace necesario la utilización de estas gráficas para la lectura del exceso de aire una vez medido el CO<sub>2</sub> ó el O<sub>2</sub>.

Si desconocemos la composición del combustible, podemos medir el CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO con una ORSAT y calcular el exceso de aire con una fórmula matemática.



Una vez determinado el exceso de aire se debe de medir las temperaturas de sala y de chimenea. En combustibles con humedad se deberá medir la misma en forma precisa.

La Eficiencia en este caso (que no conocemos las otras pérdidas) la llamaremos :

$$\underline{\text{Eficiencia a la Combustión (y Transf.)}} = 100 - \% \text{ Pérdidas en chimenea.}$$

También en este caso cuando hablamos de Eficiencia debemos indicar a que Poder Calorífico nos referimos (P.C.S. ó P.C.I.).

Cuando estamos calculando la Eficiencia al P.C.S. debemos sumar las pérdidas debidas a la evaporación del agua de formación en la combustión y del agua que trae el combustible como humedad.

Cuando calculamos la Eficiencia al P.C.I. no tenemos en cuenta el calor que consume la evaporación del agua de formación de la combustión y la del agua que trae el combustible como humedad. (en realidad ignoramos este calor producido y consumido por el agua).

La humedad ambiente no la tendremos en cuenta, ya que afecta levemente a ambas (pero cuando comparamos Eficiencias tomadas de la misma manera esta no afecta la diferencia en un valor importante).

Cuando compare Eficiencias, compare a las mismas referencias : P.C.S. ó P.C.I.

Si llamamos :

Ai.....Aire mínimo por kg. de combustible (aire teórico)

Ag.....Agua de formada por la combustión + agua de la humedad del combustible

A%.....Exceso de aire (medido por medio del CO<sub>2</sub> ó del O<sub>2</sub>) (Coeficiente Exc. Aire x 100 - 100 = A%)

Cp..... Calor específico de los gases de combustión (aproximado 0,25 Kcal./kg.)

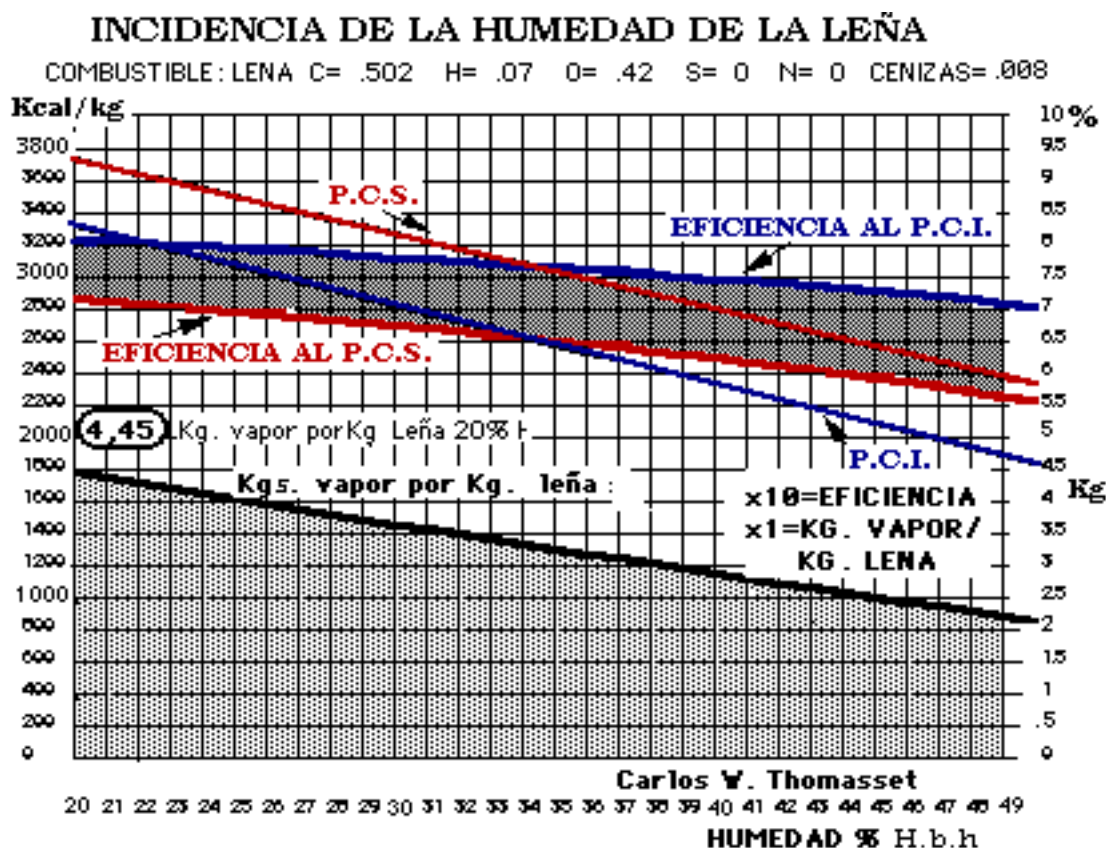
T2.....Temperatura de gases de chimenea en °C.

T1.....Temperatura del aire de la sala que entra en combustión en °C.

$$\text{Eficiencia comb. P.C.S.} = 100 - \frac{[(1 + A_i \times (1 + A\%/100)) \times C_p \times (T_2 - T_1) + A_g \times 600]}{\text{P.C.S.}} \times 100 = \%$$

$$\text{Eficiencia combustión P.C.I.} = 100 - \frac{[1 + A_i \times (1 + A\%/100) \times C_p \times (T_2 - T_1)]}{\text{P.C.I.}} \times 100 = \%$$

**ESTAS FÓRMULAS SON VALEDERAS** (aproximadas a  $\pm 1,5\%$ ) **SIEMPRE QUE HAYA COMBUSTIÓN COMPLETA** (o sea que no hay presencia de monóxido de carbono (CO) en los gases, ya que por cada 1% de CO en los gases la Eficiencia baja entre 4 y 7 % de su valor). Como se ve, la diferencia no solo es en el Poder Calorífico, sino que en agua es tenida en cuenta al usar el P.C.S..



En el gráfico anterior (para leña) se ve que a medida que aumenta el contenido de humedad de la leña, la Eficiencia al P.C.S. disminuye más, lo que expresa que la medida de la Eficiencia en relación al P.C.S. incide más el tenor de humedad, que la referida al P.C.I. (por lo que la referida al P.C.I. indica mejor la Eficiencia en referencia al comportamiento de la caldera).

### MEJORAS EN LA EFICIENCIA DE LAS CALDERAS

Es evidente que para que una caldera opere en la forma más económica posible, se deben de tener en cuenta todas las pérdidas.

La caldera debe de estar limpia de incrustaciones y fundamentalmente de hollín, ya que estos aíslan las superficies de metal que transfieren el calor de la combustión al agua y el vapor (sobrecalentado), cuanto más sucias estén estas superficies, para la misma capacidad de producción de vapor, mayor será la temperatura de los gases de chimenea, provocando una pérdida que es proporcional a la misma. Por lo tanto es una buena técnica mantener un control sobre la temperatura de chimenea, de manera de poder efectuar la limpieza de hollín cuando se note un aumento de temperatura de más de 20 °C (el hollín es muy aislante).

El exceso de aire debe de ser mantenido al mínimo, este mínimo debe de ser aquel que no produzca hollín que ensucie la superficie de transferencia mucho antes de la posibilidad de la limpieza del mismo o **que como en el caso de la leña no produzca monóxido de carbono CO (gases también)**. Cuanto más húmeda es la leña mayor es el problema de quemar sin producir CO (esta necesita más exceso de aire, por esta razón aumenta su pérdida en chimenea, casi por lo general se necesita un exceso de aire el doble que el % de humedad).

El exceso de aire para que haya una buena combustión y sea mínimo depende del tipo de quemador, del mantenimiento y ajuste del mismo, en el caso de la leña esta influenciado por la humedad de la misma y por la forma de la carga en el hogar.

También puede haber exceso de aire provocado por filtraciones de aire por las paredes y tapas o puertas de inspección, aire que no entra en la combustión pero nos roba calor para expulsarlo por la chimenea. Por lo que se procura de trabajar con el mínimo de depresión en el interior del hogar de manera de que la infiltraciones sean de mínimo valor.

En el caso de la leña es evidente que cuanto más seca sea la misma (menor su humedad), mejor será su rendimiento, pero hay un costo de estacionamiento y un envejecimiento de la leña (pérdida de volátiles en leñas de largo estacionamiento).

La combustión tiene que ser lo más continua posible, evitando los picos, por eso es mejor un quemador de modulación continua y en el caso de la leña la carga pareja y distribuida en el tiempo. (Esto hace que la Eficiencia varíe en varios puntos en cualquier quemador o sistema).

#### **FORMA PRACTICA**

##### **Combustión del F.Oil :**

Con la observación de la llama (buscando un color rojo brillante, casi naranja - no negro ni destellante), la llama relativamente corta, observando fundamentalmente los humos (que sean apenas de color carmelita, ni oscuros (falta de aire), ni transparentes o blancos (exceso de aire)).

##### **Leña :**

En la combustión a leña los humos son muy difícil de observar (la humedad de la leña influye en su aspecto). Para buscar fundamentalmente una combustión completa, es mejor mirar la forma de la llama en el hogar : En calderas humo-tubulares la llama debe de entrar al hogar cilíndrico hasta la mitad del tubo del hogar - si la llama es más larga estamos obteniendo monóxido (gases sin quemar) y si no entra en el hogar :hay exceso de aire. En las acuo-tubulares la llama debe de llegar hasta el banco convectivo, pero no penetrar en su interior.

**En los gases :** la llama podrá ser azulada o más naranja (según tipo de combustión) es muy difícil de predecir a "ojo" el exceso de aire, además no tendremos humos en la chimenea que nos indique una falta de aire o mala combustión.

**No hay mejor forma que medir los gases de chimenea para asegurarse de una buena combustión.**

**Se insiste, en la quema de leña y gases no tiene significado una medición de gases si no se mide el monóxido de carbono (CO), es mucha su influencia en la Eficiencia de la caldera.**

Una vez que hemos calculado la Eficiencia directa y Eficiencia a la combustión (y Transferencia), podemos calcular las pérdidas que no son debidas a los gases de chimenea, calculando las diferencia entre ellas (no mezclando Poderes caloríficos).

Pérdidas fijas = Eficiencia a la combustión - Eficiencia directa

Eficiencia Indirecta = Eficiencia a la combustión - Pérdidas fijas.

**AHORRO=  $\frac{[Eficiencia\ mejorada - Eficiencia\ anterior]}{Eficiencia\ mejorada} \times 100 = \%$**

La Eficiencia mejorada y la Eficiencia anterior, puede ser tanto ambas referidas a la Eficiencia Total o ambas la Eficiencia de Combustión y Transferencia, ambas referidas al mismo P.C.

Vea los gráficos a anteriores para establecer la zona de trabajo del exceso de aire.

Los valores estos gráficos fueron trazados por computadora, tomando una composición del combustible que en la práctica podrá ser algo distinta, pero que tienen suficiente aproximación para el trabajo común, ya que el error que se pueda establecer no será mayor que el error que se pueda cometer con los instrumentos de medida.

Se aconseja medir o chequear los instrumentos a utilizar, de lo contrario usar la medida del CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>, más monóxido si fuera necesario, para comprobar si nos encontramos en una medida coherente en los gráficos.

En caso que la medidas no "cierren" en los gráficos (especialmente en el triángulo de OSTWALD), repetir varias veces, pero no olvidar que en el caso de la leña, la misma esta sometida a variaciones que pueden afectar estos resultados (putrefacción, pérdidas de volátiles, orígenes variados, etc.).