



ASME PTC-4 – MÉTODO INDIRECTO - MÉTODO PÉRDIDAS EN CHIMENEA

Este método aproximado de cálculo de pérdidas en chimenea para estimar la eficiencia de la Caldera.

Parámetros

Los parámetros necesarios para efectuar el cálculo por este método son los indicados más abajo. Estos datos son calculados mediante ensayos en la planta.

1. Temperatura de Gases de Chimenea (T_{Stack})
2. Porcentaje de Oxígeno en los humos secos ($O_{2Dry, \%}$)

1

Resumen de Calculo

Calculo de la masa de humos secos por pie cúbico standart de combustible:

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) + 15,371 \quad \text{Eq.-5}$$

Calculo de Pérdidas secas en la chimenea

$$L_{DG} [\%] = 9,482 + DG \times (T_{Stack} - 70) \quad \text{Eq.-7}$$

Calculo de Pérdidas húmedas en la chimenea

$$L_{WG} [\%] = 9,482 + 0,004351 \times T_{Stack} \quad \text{Eq.-11}$$

Eficiencia de la Caldera

$$BE = 100\% - L_{DG} - L_{wg} - 1\%_{OtherLosses} \quad \text{Eq.-12}$$



Suposiciones

Las suposiciones adoptadas para el cálculo son las siguientes:

1. 1% de pérdida de energía por radiación y convección.
2. Pérdidas asociadas a monóxido de carbono en los gases es despreciable.
3. Pérdidas asociadas a la humedad del combustible es despreciable.
4. Pérdidas asociadas a la humedad del aire es despreciable.

2

ARB asume la siguiente composición del gas natural para los cálculos:

Tabla 1: Composición asumida del gas natural.

Constituyente	Formula	% Volumétrico
Metano	CH ₄	95
Etano	C ₂ H ₆	2
Propano	C ₃ H ₈	1
Nitrógeno	N ₂	2

Para el cálculo se deben utilizar los siguientes datos del combustible

Tabla 2: Datos Adicionales del Combustible

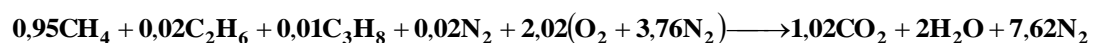
Datos	Valor	Unidad
Densidad de Combustible	0,0445	Lb/cubic ft
HHV	1022,71	BTU/cubic ft
HHV	22983,189	BTU/lb

Datos	Valor	Unidad
Densidad de Combustible	0,7128	Kg/m ³
HHV	9101,41	Kcal/m ³
HHV	12768,65	Kcal/Kg

Soporte de Cálculo

Combustión de Gas Natural

La combustión estequiométrica del gas natural está representada por la siguiente ecuación:



Eq.-1



El número de moles de humos secos es igual a la suma de moles de CO₂ y N₂, es decir 8,64 Kmol o lbmols.

Se deberá convertir la fracción volumétrica de los constituyentes de humos en fracción másica. La conversión del dióxido de carbono y el nitrógeno la dan las siguientes ecuaciones:

$$M_{CO_2} = \frac{1,02 \text{KmolCO}_2}{\text{KmolComb.}} \times \frac{44 \text{KgCO}_2}{\text{KmolCO}_2} \times \frac{1 \text{KmolComb.}}{16,8 \text{KgComb.}} = 2,671 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{KgComb.}}$$

$$M_{N_2} = \frac{7,62 \text{KmolN}_2}{\text{KmolComb.}} \times \frac{28 \text{KgN}_2}{\text{KmolN}_2} \times \frac{1 \text{KmolComb.}}{16,8 \text{KgComb.}} = 12,700 \frac{\text{KgN}_2}{\text{KgComb.}}$$

Eq.-2

Para el cálculo del peso adicional por el exceso de aire, se utilizan las mediciones efectuadas en la caldera. Se utiliza la proporción volumétrica de oxígeno en los humos secos. La ecuación también utiliza el porcentaje de oxígeno en el aire: 21%. El cálculo es el siguiente:

$$\text{ExcesoAire} \left[\frac{\text{ft}^3 \text{air}}{\text{ft}^3 \text{fuel}} \right] = 8,64 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) = \text{ExcesoAire} \left[\frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 \text{comb.}} \right] \quad \text{Eq.-3}$$

Para convertir la ecuación de arriba de fracción volumétrica en fracción másica, se debe multiplicar por la densidad del aire standart 60°F y a nivel del mar: 0,0759 lb/ft³ o 1,2158 Kg/m³.

$$\text{ExcesoAire} \left[\frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb.}} \right] = 8,64 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) \times 1,2158 \frac{\text{Kg aire}}{\text{m}^3 \text{aire}} \times \frac{1 \text{m}^3 \text{comb.}}{0,7128 \text{Kg Comb.}}$$

$$\text{ExcesoAire} \left[\frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg comb.}} \right] = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) \quad \text{Eq.-4}$$



El resultado se debe sumar a los otros constituyentes de los humos secos de las ecuaciones -2 para calcular el peso total de los humos secos por m³ o ft³ de combustible.

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) + 2,671 + 12,700$$

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) + 15,371 \text{ Kg. humos secos/Kg. Comb. Eq.-5}$$

4

La pérdida de energía por calor sensible en los humos secos es igual al producto de peso de los humos por el calor específico y la variación de temperatura. Para el calculo se asume una temperatura inicial de 21,11 °C (70°F) y se estima el calor específico del aire 0,24 Kcal/Kg.°C o BTU/lb.°F .

$$E_{sensible} = DG \times 0,24 \times (T_{Stack} - 21,11) \text{ Kcal/Kg Eq.-6}$$

El porcentaje de energía pérdida es igual a la relación entre el calor sensible por unidad de combustible dividido el poder calorífico superior del combustible.

$$L_{DG} = \frac{E_{sensible}}{HHV} = \frac{0,24}{12768,65} \times DG \times (T_{Stack} - 21,11) \times 100$$

$$L_{DG} [\%] = 0,001879 \times DG \times (T_{Stack} - 21,11) \text{ Eq.-7}$$

Para calcular las pérdidas por la humedad de los humos producto de la vaporización del agua producto de la combustión, primero se necesita calcular la masa de agua en los humos. La ecuación es la siguiente:

$$M_{H_2O} = \frac{2 \text{KmolH}_2\text{O}}{\text{KmolComb.}} \times \frac{18 \text{KgH}_2\text{O}}{\text{KmolH}_2\text{O}} \times \frac{1 \text{KmolComb.}}{16,8 \text{KgComb.}} = 2,143 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgComb.}} \text{ Eq.-8}$$

El calculista necesita determinar la variación de entalpía del agua desde la condición inicial, liquido a 70 °F (21,11 °C), hasta el estado 2 de vapor sobrecalentado a la temperatura T_{Stack}. Aunque, la entalpía requiere dos estados para ser calculada, los calculistas han encontrado pequeños cambios de la entalpía del agua líquida y el vapor sobrecalentado. En un rango de presión de 1 a 5 PSIA (68,94 a 344,73 mbar) la variación es menor del 0,1 %. La entalpía del agua líquida a 21,1 °C es 21,1 Kcal/Kg. (70°F es 38,06 BTU/lb). La entalpía del vapor sobrecalentado puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:



$$h_{\text{steam}} \left[\frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \right] = 1055 - (0,467 \times T_{\text{Stack}})$$

$$h_{\text{steam}} \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right] = 586,12 - (0,467 \times T_{\text{Stack}})$$

Eq.-9

La ecuación 9 es válida para rangos de operación de los gases de salida de chimenea entre 93,33 °C a 260 °C (200 a 500 °F), con error en las pérdidas del 0,1 %.

El cálculo de la energía usada para calentar y vaporizar el agua, se realiza multiplicando el incremento de entalpía del agua por la masa de agua por unidad de masa de combustible.

$$E_{\text{Water}} = M_{\text{water}} \times \Delta h = 2,143 \times (1055 + (0,467 \times T_{\text{Stack}})) - 38,06$$

$$E_{\text{Water}} = 2179,3 + T_{\text{Stack}} \quad \text{Eq.-10}$$

$$E_{\text{Water}} = M_{\text{water}} \times \Delta h = 2,143 \times (586,12 + (0,467 \times T_{\text{Stack}})) - 21,1$$

$$E_{\text{Water}} = 1210,8378 + T_{\text{Stack}}$$

El porcentaje de energía pérdida es igual a la relación de la energía pérdida por unidad de masa y el poder calorífico superior del combustible.

$$L_{\text{WG}} = \frac{E_{\text{Water}}}{\text{HHV}} = \frac{1210,8378 + T_{\text{Stack}}}{12768,65} \times 100$$

$$L_{\text{WG}} [\%] = 9,482 + 0,00783168 \times T_{\text{Stack}} \quad \text{Eq.-11}$$

La eficiencia de la caldera es el descuento de la suma de las pérdidas de energía. Estimado 1% las pérdidas por radiación y convección. La ecuación queda:

$$\text{BE}[\%] = 100\% - L_{\text{DG}} - L_{\text{WG}} - 1\%_{\text{OtherLosses}} \quad \text{Eq.-12}$$

Aplicación en Caso Práctico

Durante las tareas de inspección de una caldera Fimaco modelo HL 3 FH 360 / 10 GA se realizó el análisis de combustión y corrección de la misma para optimizar la eficiencia térmica del generador de vapor.

Las mediciones se realizaron mediante u analizador de gases de combustión marca Testo Modelo 342-3 y los resultados de las mediciones antes y después de la corrección son los siguientes:

Análisis de Composición de Gases			
Parámetro	Medición 1	Medición 2	Unidades
T _{Stack}	227,9	170	°C
CO ₂	5,7	10,9	%
CO	216	42	ppm
E.A.	108	9	%
O ₂	10,9	1,7	%
NO	31	249	ppm

Calculo de la Eficiencia con los parámetros de la medición inicial

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) + 15,371$$

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{10,9}{21 - 10,9} \right) + 15,371 = 31,274$$

$$L_{DG}[\%] = 0,001879 \times DG \times (T_{Stack} - 21,11)$$

$$L_{DG}[\%] = 0,001879 \times 31,274 \times (227,9 - 21,11) = 12,151$$

$$L_{WG}[\%] = 9,482 + 0,00783168 \times T_{Stack}$$

$$L_{WG}[\%] = 9,482 + 0,00783168 \times 227,9 = 11,266$$

$$BE[\%] = 100\% - L_{DG} - L_{WG} - 1\%_{OtherLosses}$$

$$BE[\%] = 100\% - 12,1517 - 11,266 - 1 = 75,58$$



Calculo de la Eficiencia con los parámetros de la medición final

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{O_{2\%}}{21\% - O_{2\%}} \right) + 15,371$$

$$DG = 14,7365 \times \left(\frac{1,7}{21 - 1,7} \right) + 15,371 = 16,669$$

$$L_{DG}[\%] = 0,001879 \times DG \times (T_{Stack} - 21,11)$$

$$L_{DG}[\%] = 0,001879 \times 16,669 \times (170 - 21,11) = 4,663$$

$$L_{WG}[\%] = 9,482 + 0,00783168 \times T_{Stack}$$

$$L_{WG}[\%] = 9,482 + 0,00783168 \times 170 = 10,813$$

$$BE[\%] = 100\% - L_{DG} - L_{WG} - 1\%_{OtherLosses}$$

$$BE[\%] = 100\% - 4,663 - 10,813 - 1 = 83,52$$

RESULTADO DE LA MEJORA DE EFICIENCIA TÉRMICA

$$BE[\%]_2 - BE[\%]_1 = 83,52\% - 75,58\% = 7,94\%$$

El generador de vapor considerado posee una producción de vapor de 5.382 Kg/h, operando a 10 Kg/cm² con la temperatura de alimentación de 60 °C.

El consumo de energía para la mencionada producción de vapor con las distintas eficiencias calculas será:

$$CE_1[\text{Kcal/h}] = \frac{m \times (h_f - h_i)}{BE_1}$$



$$CE_1[\text{Kcal/h}] = \frac{5382 \times (664,1 - 60,1)}{0,7558} = 4.301.042,60$$

$$CE_2[\text{Kcal/h}] = \frac{m \times (h_f - h_i)}{BE_2}$$

$$CE_2[\text{Kcal/h}] = \frac{5382 \times (664,1 - 60,1)}{0,8352} = 3.892.155,17$$

8

Ahorro de Energía

$$CE_1[\text{Kcal/h}] - CE_2[\text{Kcal/h}] = 4.301.042,60 - 3.892.155,17 = 408.887,43$$

Transformado de m³ normales de gas natural resulta:

$$\Delta CE[\text{m}^3/\text{h}] = \frac{408.887,43}{9.300} = 43,96$$

$$\Delta CE[\text{m}^3/\text{mes}] = 43,96 * 24 * 30 = 31.665$$

Considerando un consumo promedio de 400 m³ mensuales por hogar, el resultado sería:

$$\Delta CE[\text{Hogares}] = \frac{31.665}{400} = 79,16$$

Conclusión: Con la mejora de rendimiento térmico del equipo intervenido, se logró un ahorro de energía equivalente al consumo de energía de 79 hogares de 400 m³ mensuales. El beneficio no solo redunda en la disponibilidad de oferta de energía, sino que el establecimiento al operar el generador de vapor en forma más eficiente reduce los costos de combustible, la amortización de la caldera y disminuye el impacto sobre el medio ambiente.