



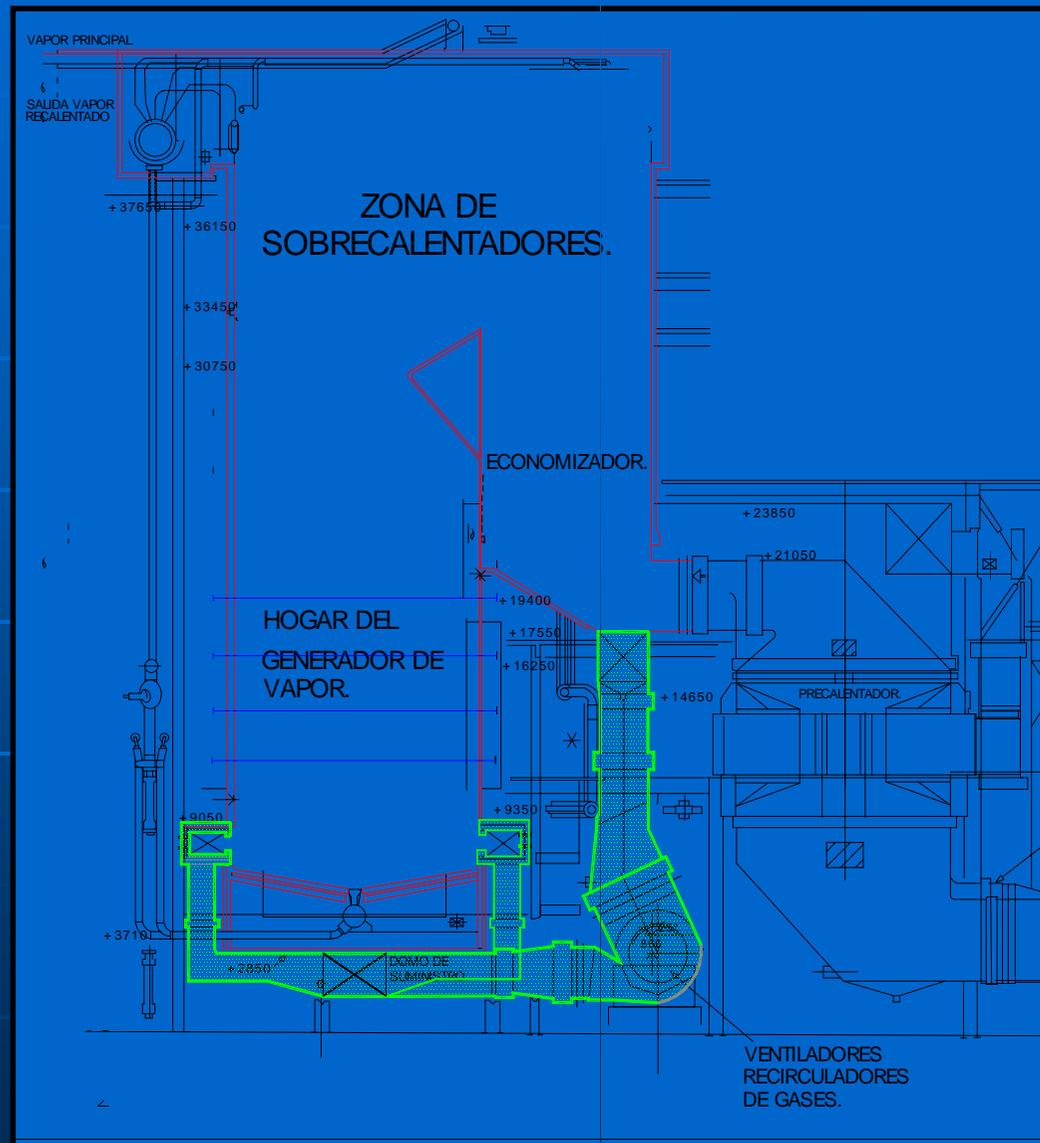
Cálculo de la transferencia de calor en la cámara de combustión de un generador de vapor de 350 MW



GENERADOR DE VAPOR DE 350 MW

El estudio se realizó en una caldera de 350 MW ubicada en la planta termoeléctrica Villa de Reyes, México.





FUNCIONES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

1. Combustión del combustible

2. Transferencia de calor desde los productos de la combustión hacia las superficies de absorción

Parámetros de combustión

Composición	Elemento	%
	C	84.9
	H	10.8
	S	3.8
	O	0
	N	0.4
	W	0
	Z	0.1
	Total	100



V_{gas}	11.8362 m ³ /kg
V_{RO_2}	1.6056 m ³ /kg
$V^0_{N_2}$	8.3269 m ³ /kg
V_{R_2}	8.8537 m ³ /kg
V_{H_2O}	1.3769 m ³ /kg

Método de cálculo de comprobación de temperatura en salida de cámara

$$\theta''_{hogar} = \frac{T''_{hogar}}{T_a} = \frac{Bo^{0.6}}{M \cdot a_{hogar}^{0.6} + Bo^{0.6}}$$

Donde:

- θ''_{hogar} : Temperatura adimensional de los productos de la combustión a la salida del hogar
- Bo : Número de Boltzmann
- a_{hogar} : grado de emisividad del la cámara, [-]
- M : parámetro que considera el carácter de la distribución de temperaturas de los gases por la altura del hogar
- T''_{hogar} : temperatura de los gases a la salida del hogar, [K]
- T_a : temperatura adiabática de los gases de combustión, [K]

Número de Boltzmann

$$Bo = \frac{\varphi \cdot m_{comb} \cdot V_{gas} \cdot \bar{c} \cdot 10^3}{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \eta_{pared} \cdot A_{pared} \cdot T_a^3}$$

Donde:

- φ : coeficiente de conservación del calor en la cámara
- m_{comb} : gasto de combustible, kg/s
- A_{pared} : área de las paredes del hogar, [m²]
- $V \cdot \bar{c}$: calor específico medio de los gases de combustión de un 1 kg de combustible en el intervalo de temperaturas de T''_{hogar} hasta T_a [kJ/(kg K)]
- η_{pared} : valor medio del coeficiente de la eficiencia térmica de las paredes
- $5.67 \cdot 10^{-8}$: Coeficiente de radiación del cuerpo negro, [W/(m² K⁴)]

Calor de aire precalentado (kJ/kg o kJ/m³)

$$Q_{\text{aire ext.}} = \alpha_{\text{pr. aire}} (I_{\text{aire cal.}}^{87^{\circ}\text{C}} - I_{\text{aire frio}}^{263^{\circ}\text{C}})$$

• $\alpha_{\text{pr. aire}} : 12.9$



Calor disponible en la cámara de combustión (kJ/kg o kJ/m³)

$$Q_{disp}^{tr} = Q_{inf}^{tr} + Q_{aire\ ext} + i_{comb.} + Q_{vapor}^{quemador} - Q_{carbonato}$$

Donde:

- Q_{inf}^{tr} : poder calorífico inferior, kJ/kg
- $i_{comb.}$: calor físico que aporta el combustible, kJ/kg
- $Q_{vapor}^{quemador}$: calor agregado al hogar por el vapor de pulverización del combustóleo. $Q_{vapor}^{quemador} = 0$
- $Q_{carbonato}$: calor que se consume en la

Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg o kJ/m³)

$$Q_{inf}^{tr} = 338 C + 1256 H + 109 (O - S) - 25(9H - W)$$

Calor físico del combustóleo

$$i_{comb.} = c_{comb.} \cdot t_{comb.}$$

Donde:

- $c_{comb.}$: es el calor específico del combustible, kJ/(kg·K)
- $t_{comb.}$: temperatura del combustible. °C

Calor útil en la cámara de la caldera (kJ/kg o kJ/m³)

$$Q_{hogar} = Q_{dsip}^{tr} \frac{100 - q_3 - q_4}{100 - q_4} + Q_{aire} - Q_{aire\ extr.} + r \cdot I_{gas\ redc}$$

Donde:

- Q_{hogar} : calor util en el hogar de la caldera (kJ/kg o kJ/m³)
- Q_{dsip}^{tr} : poder calorífico inferior, kJ/kg
- Q_{aire} : calor que lleva al hogar el aire, kJ/kg o kJ/m³
- $Q_{aire\ extr.}$: calor que lleva al hogar el aire que es calentado afuera del generador de vapor por alguna fuente de calor externa
- $r \cdot I_{gas\ redc}$: calor de los productos de la combustión de recirculación que se consideran solo si se regresan al hogar parte de los productos de la combustión que se toman del ducto de gases del generador de vapor. En nuestro caso $r \cdot I_{gas\ redc} = 0$

Eficiencia térmica de las paredes de agua

$$\phi = \chi \cdot \zeta$$

Donde:

- χ : Factor de forma de las paredes de agua.
- ζ : Coeficiente ensuciamiento o incrustaciones.



Espesor de la capa de radiación, m:

$$s = 3.6 \cdot V_{hogar} / F_{pared}$$

Donde:

V_{hogar} : volumen del hogar, m³

F_{pared} : área de las paredes del hogar, m²



Coeficiente de debilitamiento de los rayos (k),
 $(m \cdot MPa)^{-1}$

$$k = r_{3a\ gas} \cdot k_{3a\ gas} + k_{negro}$$

Donde:

- $r_{3a\ gas}$: porción volumétrica de los gases triatómicos. En nuestro caso
 $r_{3a\ gas} = 0.1357$
- $k_{3a\ gas}$: coeficiente de debilitamiento de los rayos por los gases triatómicos

Coeficiente de debilitamiento de los rayos (k),
 $(m \cdot MPa)^{-1}$

$$k_{3a\ gas} = \left(\frac{7.8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3.16 \cdot \sqrt{p_{parS}}} - 1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T''_{hogar}}{1000} \right)$$

Donde:

- $p_{par} = r_{3a\ gas} \cdot p -$: es la presión parcial de los gases triatómicos, Mpa
- $p -$: presión en el hogar de la caldera. $p = 0.1$ MPa
- r_{H_2O} : porción volumétrica de vapores de agua.

El coeficiente de debilitamiento por las cenizas

$k_{negro}, (m \cdot MPa)^{-1}$

$$k_{negro} = 0.3(2 - \alpha_{hogar}) \left(1.6 \frac{T''_{hogar}}{1000} 0.5 \right) \frac{C}{H}$$

Donde:

- C y H: porcentaje del contenido de carbono e hidrógeno en el combustible

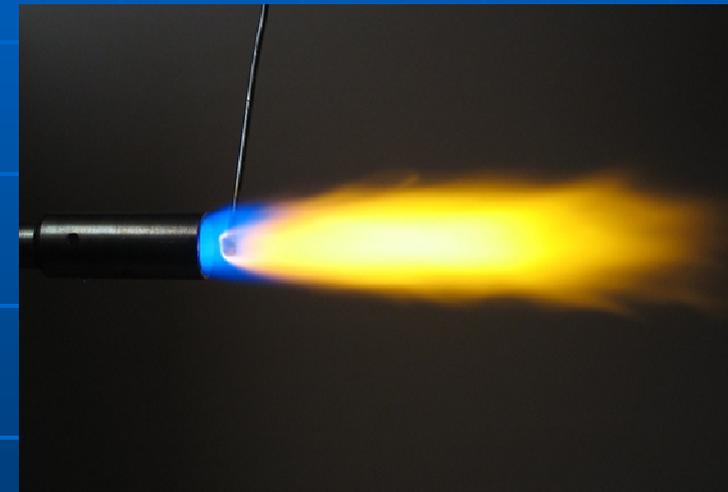


Emisividad térmica de la flama

- $a_{flama} = m a_{lum} + (1 - m) a_{no lum}$

Donde:

- m : coeficiente que caracteriza la fracción del volumen de la parte brillante de la flama, para Combustóleo $m = 0.55$
- a_{lum} y $a_{no lum}$: grado de emisividad de la parte brillante y opaca de la flama de los gases



Emisividad (ilumina, no ilumina)

$$a_{lum} = 1 - e^{-(k \cdot p \cdot s)}$$

$$a_{no lum} = 1 - e^{-(r_{3a gas} \cdot k_{3a gas} \cdot p \cdot s)}$$

• Emisividad del hogar:

$$a_{hogar} = \frac{a_{flama}}{a_{flama} + (1 - a_{flama}) \cdot \phi}$$

Posición relativa de quemadores

$$M = 0.54 - 0.2x_{hogar}$$

$$x_{hogar} = \frac{h_{quemador}}{H_{hogar}}$$

a varios niveles de quemadores:

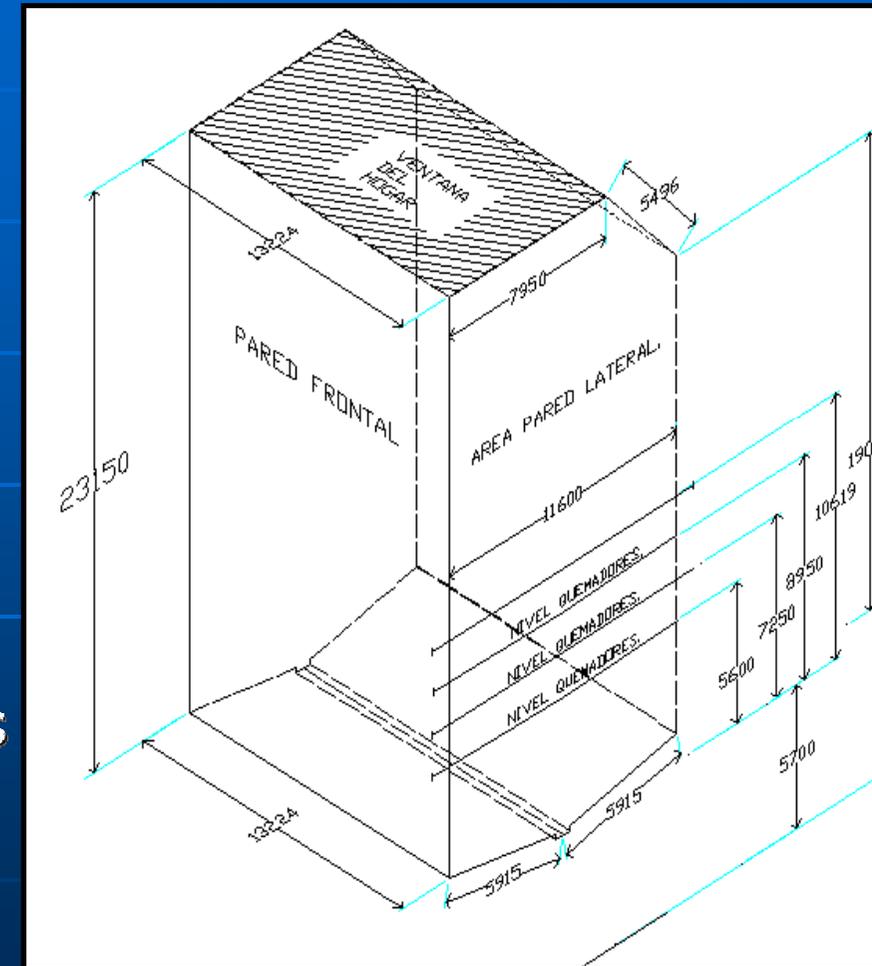
$$h_{quemador} = \frac{n_1 h_1 + n_2 h_2 + n_3 h_3 + \dots + n_n h_n}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_n}$$

de:

H_{hogar} : es la altura total del hogar, m

$n_1 \dots n_n$: es el número de niveles de quemadores

$h_1 + h_n$: son las alturas de cada nivel de quemadores desde el fondo del hogar



Calor específico promedio de los gases de combustión (kJ/(kg K))

$$V \cdot \bar{c} = \frac{Q_{\text{hogar}} - I''_{\text{hogar}}}{T_a - T''_{\text{hogar}}}$$

• Temperatura adiabática:

$$T_a = f(Q_{\text{hogar}})$$

COMBUST V1.0

Resultados para el combustóleo. Empleando COMBUST V1.0

Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0

Programa Tipo Operación Ventana

Ventana de Entrada de datos (Combustoleo)

Datos de Inicio del Combustoleo

C	S	N	H	O	W
84.9	3.8	0.4	10.8	0.0	0.0

	Alpha 1	Alpha 2	Alpha 3	Alpha 4	Alpha 5
Nombre	Alfa 1	Alfa 2	Alfa 3	Alfa 4	Alfa 5
Razon	1.1	1.12	1.15	1.16	1.18
L. Inf	100	100	100	100	100
L. Sup	2200	2200	2200	2200	2200
Interpol1					
Interpol2					
Interpol3					

Nombre del archivo de Salida

Nuevo proyecto de Combustoleo

Figura 5. Ventana de entrada de datos del software COMBUST para ingresar la composición másica del combustóleo

COMBUST V1.0

Calculo de Entalpia y Combustible COMBUST 1.0 - [Calculo de Gases para Combustoleo del Proyecto:

Programa Tipo Calcular Graficar Ventana

Datos de Calculos de Gases

Nombre del archivo : Nuevo proyecto de Combustoleo.LGN
 Volumen teorico de Aire requerido:
 VOC = 10.53629 metros_cubicos/kilogramo

Volumen de Gases Triatomicos:
 $V_{CO2} + V_{SO2} = V_{RO} \rightarrow 1.57914 + 0.02584 = 1.60498$ (metros_cubicos/Kilogramo)

Volumen Teorico de Gas Diatomico :
 $N_2 = 8.32687$ metros_cubicos/kilogramo

NOTA: La siguiente tabla expresa Sus elementos en unidades de metros_cubicos/kilogramo

Nombre	Alpha	Triatomicos	Diatomicos	GasCeco	Humedad	GasTotal
Teorico	1.00000	1.60498	8.32687	9.93185	1.37476	11.30661
Alfa 1	1.10000	1.60498	9.38050	10.98548	1.39235	12.37783
Alfa 2	1.12000	1.60498	9.59123	11.19621	1.39587	12.59208
Alfa 3	1.15000	1.60498	9.90731	11.51229	1.40115	12.91344
Alfa 4	1.16000	1.60498	10.01268	11.61766	1.40291	13.02057
Alfa 5	1.18000	1.60498	10.22340	11.82838	1.40643	13.23481

Figura 6. Ventana del software COMBUST mostrando los resultados de los volúmenes de los productos de la combustión del combustoleo

COMBUST V1.0

Entalpías de los productos de la combustión

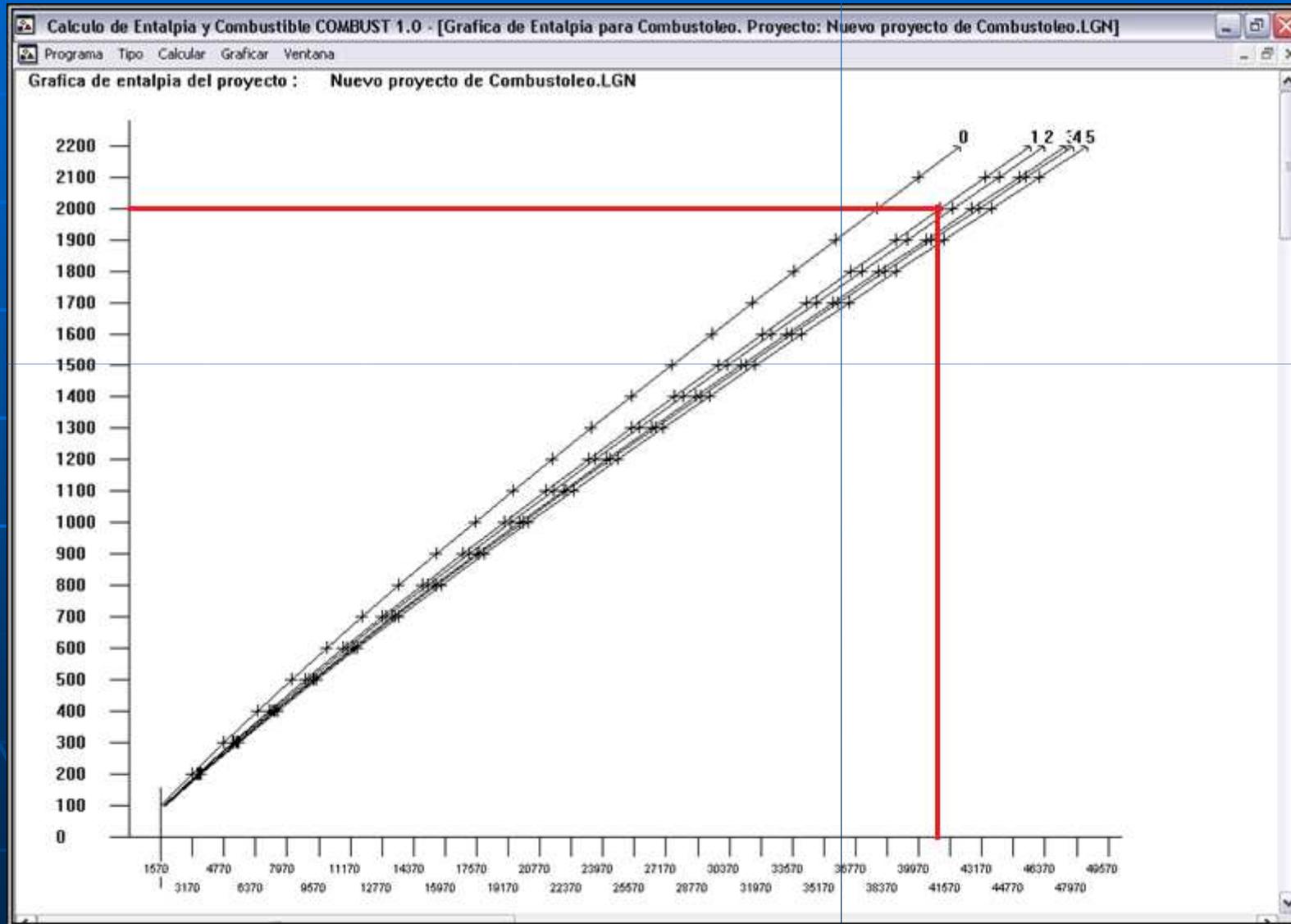
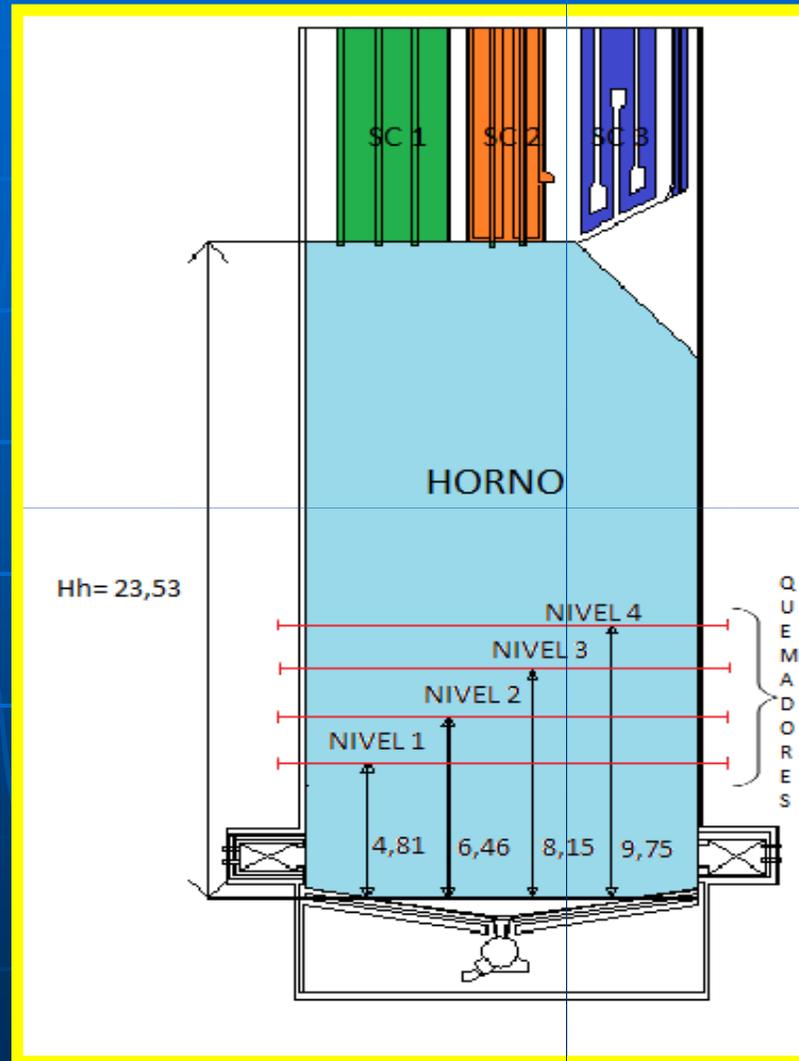


Figura 8. Gráfica COMBUST Temperatura contra Entalpía para el combustoleo

TEMPERATURA EN LA SALIDA



Temperatura en salida de cámara

Con nuestros datos:

$$T''_{hogar} = \frac{T_a}{M \left(\frac{5.67 \cdot \eta_{term} \cdot A_{pared} \cdot a_{hogar} \cdot T_a^3}{10^{11} \cdot \phi \cdot m_{comb} \cdot V \cdot \bar{c}} \right)^{0.6} + 1} - 273$$

T''_{hogar}

2661.34 K

$$= \frac{2661.34 K}{0.3764 \left(\frac{5.67 \cdot 0.546 \cdot 1427.4565 m^2 \cdot 0.6857 \cdot 2661.34^3 K}{10^{11} \cdot 0.9978 \cdot 21.0619 kg/s \cdot 21.4080 kJ/kg} \right)^{0.6} + 1} - 273$$

$$T''_{hogar} = 1555.1218 ^\circ C$$

Conclusiones

- En el trabajo se describe la metodología para el cálculo comprobatorio de las cámaras de combustión de las calderas. Esta metodología permite analizar las condiciones de transferencia de calor de la caldera y determinar la temperatura y entalpía de los gases a la salida.
- La metodología descrita permite obtener cálculos comparativos de los hogares para cuando se utilizan diferentes combustibles líquidos y gaseosos, durante cargas nominales y parciales del generador de vapor.
- La temperatura y la entalpía de los gases a la salida del hogar de la caldera son parámetros fundamentales para los cálculos subsiguientes de las superficies semiradiativas y convectivas del generador de vapor.