

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN EL HORNO DE UNA CALDERA DE ALTA POTENCIA

Guillermo J. López^a, Miguel A. Del Río-Noriega^a, Juan E. G. Fernández^a, Roselia J. López^b

^a*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, SEPI-ESIME CULHUACAN
Av. Santa Ana No. 1000, Edificio 2. Tercer piso. C.P. 04430, México, D.F.
Correo electrónico: gjarquin@ipn.mx*

^b*Centro Interdiscipli de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca. Calle
Hornos No 1003 Santa Cruz Xoxocotlán Oax. Mex. C. P. 71230. Correo electrónico:
jarose_1@yahoo.com.mx*

Palabras clave: distribución de temperaturas del horno, temperatura en la salida en el horno, caldera de potencia, Combustóleo.

Resumen. Las condiciones de transferencia de calor en los hornos de las calderas son influenciados por varios factores como son: las dimensiones del horno y las formas de las cámaras de combustión, la construcción y arreglo de los quemadores, el tipo de combustible quemado, especialmente la parte mineral y las condiciones de operación del horno.

En el presente trabajo se realiza la determinación de la distribución zonal de la captación de calor a cargas parciales y las temperaturas asociadas a los flujos de calor en cada zona o cálculo zonal del horno. En este cálculo el significado aproximado del coeficiente de captación de calor según la altura del horno se determina en dependencia de las alturas relativas del horno.

Asimismo, se determina la temperatura en la salida del horno a cargas parciales en base al método de cálculo de transferencia de calor en el horno propuesto por A. M. Gurvitch. En este método los parámetros fundamentales que definen la temperatura adimensional de los gases en la salida del horno son: el criterio de transferencia de calor por radiación de Boltzmann y el criterio de capacidad de absorción de Bugar. La ecuación de la temperatura adimensional de los gases en la salida del horno está soportada en los datos experimentales según la transferencia de calor en los hornos de las calderas de alta potencia. El estudio se realizó en un generador de vapor de 350 MW que quema combustóleo y los resultados obtenidos se compararon con los datos de la planta termoeléctrica, obteniéndose una diferencia de 6.2 % a 100% de carga.

En el horno de los generadores de vapor, ocurre intensa transferencia de calor debido a la combustión y la dispersión de las partículas sólidas y gases hacia las superficies del horno. Casi todo el calor en el horno se transfiere por radiación, el calor por convección se considera despreciable (Siegel Robert, 2002; A. G. Blokh, 1988).

En el presente trabajo se realiza la determinación de la distribución zonal de la captación de calor específica y las temperaturas asociadas a los flujos de calor en cada zona o cálculo zonal del horno. En este cálculo el significado aproximado del coeficiente de captación de calor según la altura del horno y_B se determina en dependencia de las alturas relativas del horno h / H_{horno} (A. G. Blokh, 1988; G. M. Karan, et al, 1998).

Durante el cálculo de comprobación de calderas, se parte de las dimensiones conocidas de las superficies de calefacción del horno, el diseñador encuentra el calor absorbido en el generador de vapor y la temperatura de los productos de la combustión en la salida del horno (I. T. Shvets, et al, 1987).

Además, se presenta la metodología de cálculo de la temperatura en la salida del horno en base al método de cálculo de transferencia de calor en los hornos propuesto por A. M. Gurvitch. En este método los parámetros fundamentales que definen la temperatura adimensional de los gases en la salida del horno (θ_H'') son: el criterio de transferencia de calor por radiación de Boltzmann (Bo) y el criterio de capacidad de absorción de Bugar (Bu). La ecuación temperatura adimensional de los gases en la salida del horno está soportada en los datos experimentales según la transferencia de calor en los hornos de las calderas (A. G. Blokh, 1988; G. M. Karan, et al, 1998).

El estudio de la temperatura en la salida del horno aplicando el método de Gurvich, aplicando el cálculo zonal y su comparación con los datos de temperatura reportado por el fabricante son aplicables a un generador de vapor de 350 MW que quema combustóleo.

2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En la figura 1 se muestra el hogar de la caldera de 350 MW perteneciente a la planta termoeléctrica Villa de Reyes, México. En la cual se puede observar los niveles de quemadores, el horno donde se realiza la combustión, el área de sobrecalentadores y la altura del horno H_h que sirve como referencia en el cálculo zonal.

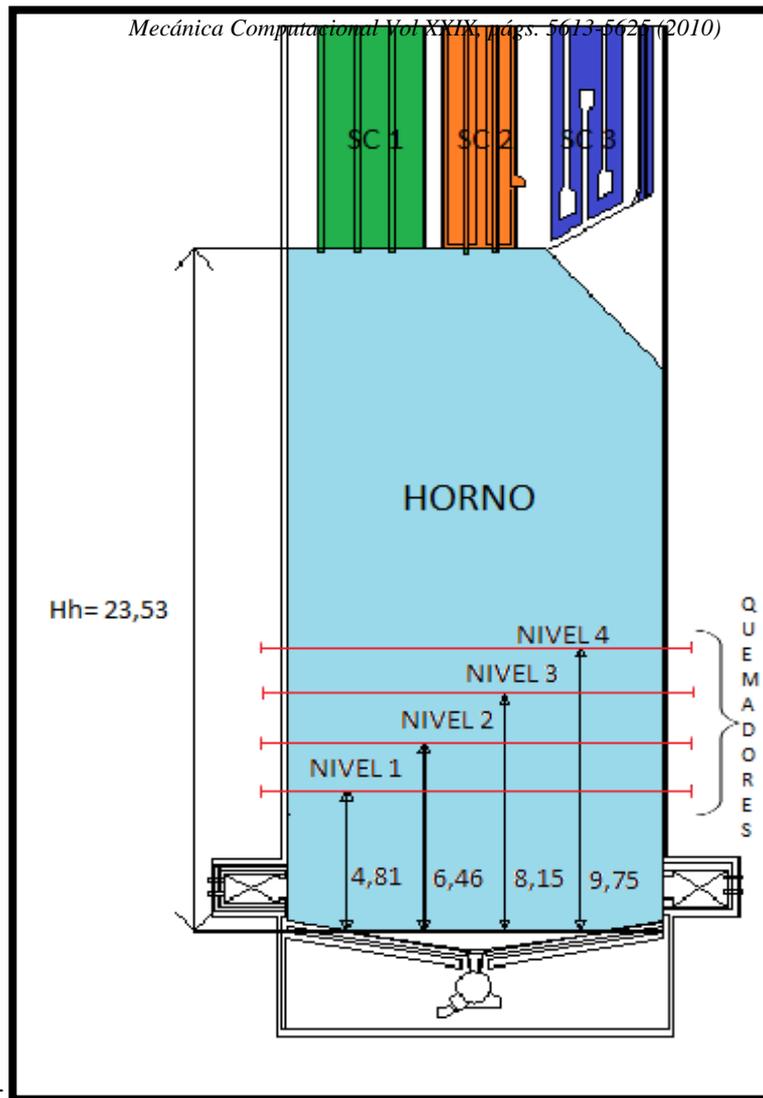


Fig. 1 Esquema del horno del generador de vapor

3 CÁLCULO TÉRMICO ZONAL DEL HORNO

La distribución de la densidad de flujo de calor según la altura del horno se determina por zonas o cálculo zonal del horno. En el caso cuando el cálculo del horno se realiza por captación específica de cada zona del horno se puede evaluar según la ecuación:

$$q_l = y_B \frac{B_{calc} Q_l \psi}{A_{pared} \psi} \quad kW / m^2 \quad (1)$$

El significado aproximado del coeficiente de captación de calor según la altura del horno y_B se determina en dependencia de las alturas relativas de las zonas y el horno h / H_{horno} según la tabla siguiente.

RANGO DE VALIDEZ CON RESPECTO A LA ALTURA DEL HORNO, "Hh"	y_B	Rango de alturas del horno
(0 - 0.3) Hh	1.2	0 - 7.31 m
(0.3 - 0.5) Hh	1.1	7.31 - 12.18 m
(0.5 - 0.7) Hh	0.8	12.18 - 17.06 m
ENTRE 0.7 Y PARTE SUPERIOR DEL HORNO	0.6	17.06 m- TECHO

Fuente: M. Karan, et al, 1998

Para llevar a cabo los cálculos de los flujos de calor con el método zonal, se basaron en los resultados presentados en la tesis de Maestría de (Jiménez García J., 2008) y son los siguientes:

Tabla 2. Resultados del cálculo térmico de la caldera de 350 MW

Parámetro	Símbolo	Unidad	MRC	100%	75%	50%
Consumo de combustible	B_{cal}	Kg/s	23.29	20.84	15.59	11.38
Calor del horno	Q_l	kJ/Kg	49148	48484	49362	49416
Eficiencia térmica de las paredes	ψ	-	0.55	0.55	0.55	0.55
Eficiencia térmica promedio de las paredes	$\bar{\psi}$	-	0.498	0.498	0.498	0.498

3.1 Transferencia de calor por radiación de los gases de combustión

Una vez determinados los flujos de calor en las diferentes zonas del horno. A continuación se determinan las temperaturas de los gases de combustión en dichas zonas. Para ello, se aplica la ecuación de la radiación de los cuerpos grises (gases de combustión) hacia las paredes de agua. La emisividad de los gases producto de la combustión del combustible es igual a 0.8 (Yunus A. Cengel, 2009). Los flujos de calor en cada zona se igualan a los flujos de calor por radiación y se despejan las temperaturas.

$$q = \sigma \epsilon T^4 \quad (2)$$

Donde:

ϵ - Emisividad de los gases de combustión, [-]

σ - constante de Stefan-Boltzmann [kW/m² K⁴] y

T- Temperatura absoluta, [K]

4 TEMPERATURA ADIMENSIONAL DE LOS GASES EN LA SALIDA DEL HORNO

Los parámetros fundamentales que determinan la temperatura adimensional de los gases en la salida del horno (θ_H'') son: el criterio de transferencia de calor por radiación de Boltzmann (Bo) y el criterio de capacidad de absorción de Buger (Bu). El tipo de dependencia funcional, relaciona entre sí estos parámetros, con fundamento en los datos experimentales según la transferencia de calor en los hornos de las calderas. Para tomar en cuenta la influencia del campo de temperaturas no isotérmicas en el horno y el efecto de la dispersión de la radiación se asegura al usar el criterio de Buger efectivo \overline{Bu} el cual se define más adelante.

$$\theta_H'' = \frac{T_H''}{T_a} = \frac{Bo^{0.6}}{M \cdot \overline{Bu}^{0.3} + Bo^{0.6}} \quad (3)$$

Donde

T_a - es la temperatura adiabática de combustión del combustible, K;

M – Parámetro, el cual toma en cuenta la influencia sobre la intensificación de la transferencia de calor relativo a la ubicación de los quemadores, el grado de lastre de los gases del horno y otros factores.

La temperatura relativa se encuentra dentro de la región $\theta_H'' \leq 0.9$

4.1 Número de Boltzmann

$$Bo = \frac{\varphi \cdot B_{calc} \cdot (Vc)_{promedio}}{\sigma_0 \cdot \psi_{promedio} A_{paredes} T_a^3} \quad (4)$$

Donde:

B_{calc} - es el gasto de combustible calculado, kg / s (m^3 / s)

$(Vc)_{promedio}$ - es el calor específico promedio de los productos de la combustión para 1kg (1m^3) de combustible en el intervalo de temperaturas $(T_a - T_H)$, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$].

$\Psi_{promedio}$ - es el coeficiente promedio de efectividad térmica de las paredes del horno.

φ - es el coeficiente de conservación de calor en el horno.

$\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ - coeficiente de emisión absoluta de cuerpo negro.

4.2 Número de Bugar Efectivo $B\tilde{u}$

$$B\tilde{u} = 1.6 \cdot \ln\left(\frac{1.4 \cdot Bu^2 + Bu + 2}{1.4 \cdot Bu^2 - Bu + 2}\right) \quad (5)$$

4.3 Número de Bugar.

La característica básica radiativa Bu representa la capacidad de absorción (número de Bugar) de los productos de la combustión en el hogar del generador de vapor.

$$Bu = k \cdot P \cdot s \quad (6)$$

Donde:

k - es el coeficiente de adsorción del medio del horno, $1/\text{m} \cdot \text{MPa}$ calculado con la temperatura y composición de los gases en la salida del horno. Para su determinación se toma en cuenta la radiación de los gases triatómicos (RO_2 , CO_2) partículas de hollín y cenizas volátiles; P es la presión en la cámara de combustión, MPa ; s es el espesor efectivo de la capa radiante, m .

Espesor efectivo de la capa radiante del horno, y se calcula por:

$$s = \frac{3.6 \cdot V_{\text{horno}}}{A_{\text{paredes}}} \quad m \quad (7)$$

Donde:

V_{horno} y A_{paredes} - son el volumen y la superficies de las paredes del horno, m^3 , m^2 .

4.4 Coeficiente de adsorción del medio del hogar

El coeficiente de adsorción del medio del hogar se calcula con uso de hipótesis que la llama que ilumina ocupa parte del hogar y se caracteriza por coeficiente m .

El cálculo del coeficiente de absorción del medio del hogar se calcula por ecuación [20]: 5619

$$k = k_{gas} + m \cdot k_{hollin}, \quad l/(m \cdot MPa) \quad (8)$$

El coeficiente de disminución de los rayos en el hogar (k_{gas}) por gases triatómicos (CO_2 , SO_2 , H_2O) se determina con la ecuación [20]:

$$k_{gas} = \left(\frac{7.8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10P \cdot r_{gas} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0.37 \frac{T_{hogar}''}{1000} \right) \cdot r_{gas}, \quad l/(m \cdot MPa) \quad (9)$$

En esta ecuación r_{gas} es la parte relativa del volumen ocupada por los gases triatómicos (CO_2 , SO_2 , H_2O) en los productos de la combustión, r_{H_2O} es el volumen relativo ocupado por vapor de agua en los productos de la combustión, T_{hogar}'' es la temperatura de los gases en salida del hogar en K .

El coeficiente de disminución de los rayos por las partículas de hollín (k_{hollin}) en la ecuación (2.29) se calcula con la fórmula [20]:

$$k_{hollin} = \frac{1.2}{1 + \alpha_{hogar}^2} \cdot \left(\frac{C}{H} \right)^{0.4} \cdot \left(1.6 \frac{T_{hogar}''}{1000} - 0.5 \right), \quad l/(m \cdot MPa) \quad (10)$$

La relación entre átomos de carbono e hidrógeno en la masa del combustible ($\frac{C}{H}$) en la ecuación (2.31) se determina por:

$$\frac{C}{H} = 0.12 \sum \frac{m}{n} \cdot C_m H_n \quad (11)$$

Donde m y n es la cantidad de átomos de carbono e hidrógeno en el combustible.

Para $\alpha_{horno} > 2$, el valor de $k_{hollin} = 0$ [20].

$$M = M_0 (1 - 0.4 \cdot x_{quemad}) \sqrt[3]{r_v} \quad (12)$$

Donde:

r_v es un parámetro de composición de los gases (lastre)

$$r_v = \frac{V_{gas}^N (1+r)}{V_{0.N_2}^N + V_{RO_2}^N} \quad m^3 / m^3 \quad (13)$$

Donde:

r - Es el coeficiente de recirculación de los gases.

V_{gas}^N - es el volumen de gases en la salida del horno sin tomar en cuenta la recirculación,
 m^3 / kg (m^3 / m^3)

4.6 Calor Específico Promedio de los Gases de Combustión

$$(Vc)_{promedio} = \frac{Q_{horno} - h_{horno}''}{T_a - T_{horno}''} \quad kJ / (kg \cdot K) \left[kJ / (m^3 \cdot K) \right] \quad (14)$$

Donde:

h_{horno}'' - Es la entalpía de productos de combustión $1 kg$ ($1 m^3$) para la temperatura T_{horno}'' , exceso de aire en salida del horno α_H y volumen $V_{gas.r}^N$.

4.7 Temperatura Adiabática

La temperatura adiabática de combustión T_a °C se determina según el desprendimiento útil de calor en el horno Q_{horno} con exceso de aire α_H .

$$Q_{\text{horno}} = Q_{\text{disp}} \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_f + Q_{\text{aire}} + \sum r h_{\text{gas}} \quad \text{kJ/kg} \quad (\text{kJ/m}^3) \quad (15)$$

Donde:

Q_{disp} - Es el calor disponible del combustible, kJ/kg (kJ/m^3)

q_3, q_4, q_6 - Son las pérdidas químicas de calor y pérdidas mecánicas por combustión incompleta, calor de escorias y de enfriamiento de agua, %.

Q_f - Calor que se introduce en el horno con el vapor de pulverización; kJ/kg .

Q_{aire} - Calor que se introduce con el aire precalentado, kJ/kg (kJ/m^3)

4.8 Coeficiente de Efectividad Térmica de las Paredes

El coeficiente de efectividad térmica de las paredes de agua es igual al producto del coeficiente angular de las paredes (Factor de forma) χ por el coeficiente ζ , que toma en cuenta el ensuciamiento de los tubos o incrustaciones.

$$\psi = \chi \cdot \zeta \quad (16)$$

Si las paredes del horno están cubiertas por paredes de agua con diferentes valores de coeficiente de efectividad térmica ψ o las pantallas cubren la parte superior de la pared, el valor promedio del coeficiente de efectividad térmica es:

$$\psi_{\text{promedio}} = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot A_{\text{pared}}}{A_{\text{pared}}} \quad (17)$$

4.9 Temperatura de los Gases en la Salida del Horno

$$T_{\text{hogar}}^n = \frac{T_a}{1 + M \cdot B\tilde{u}^{0.3} \cdot \left(\frac{\sigma_0 \cdot \psi_{\text{promedio}} \cdot A_{\text{paredes}} \cdot T_a^3}{\varphi \cdot B_{\text{calc}} \cdot (V \cdot c)_{\text{promedio}}} \right)^{0.6}} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (18)$$

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de densidad de flujo de calor y temperaturas por zonas en el horno de la caldera de 350 MW a cargas parciales, quemando combustóleo.

Los resultados más importantes obtenidos del cálculo zonal se reportan en las siguientes figuras, incluyendo la temperatura en la salida del horno. La temperatura en la salida del horno está ubicada dentro del horno, y es la temperatura que tienen los gases que están en contacto con las superficies de los sobrecalentadores.

En las figuras 2 y 3 se observa claramente que la zona de máximas temperaturas se encuentra localizada en el área de quemadores (núcleo de la flama) como era de esperarse. Ya que en esta zona se lleva a cabo el quemado del combustible.

En las figuras 4 y 5 se muestra un decremento en las temperaturas en la zona de quemadores, debido a la disminución del régimen de carga e implícitamente a la reducción del consumo de combustible. La caldera produce menos cantidad de vapor.

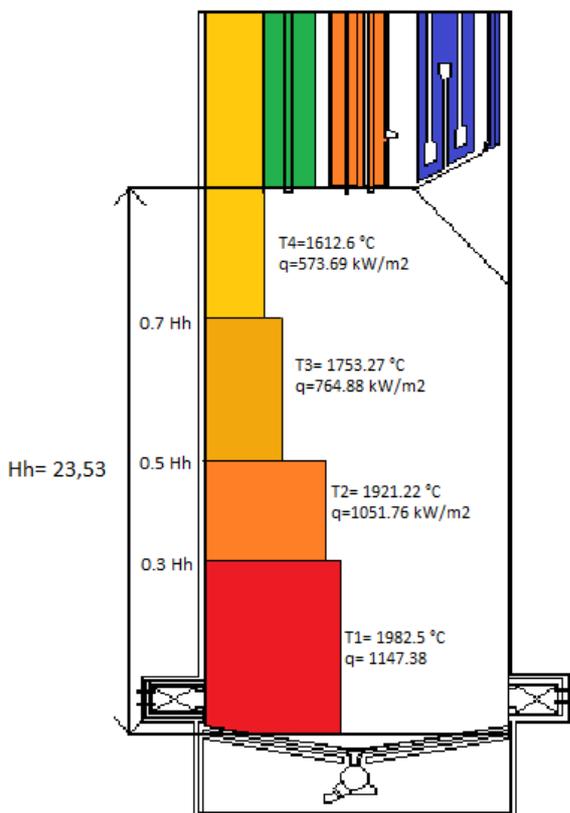


Fig. 2 Resultados del cálculo zonal a MRC

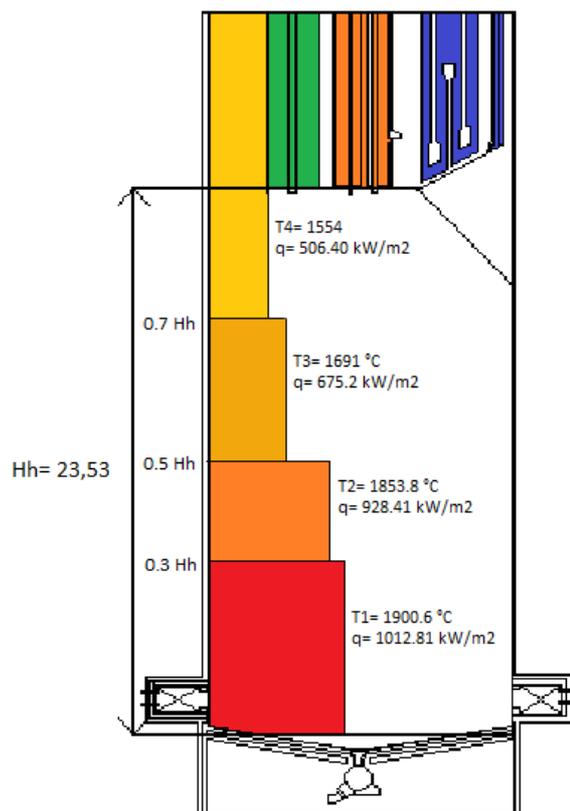


Fig. 3 Resultados del cálculo zonal a 100%

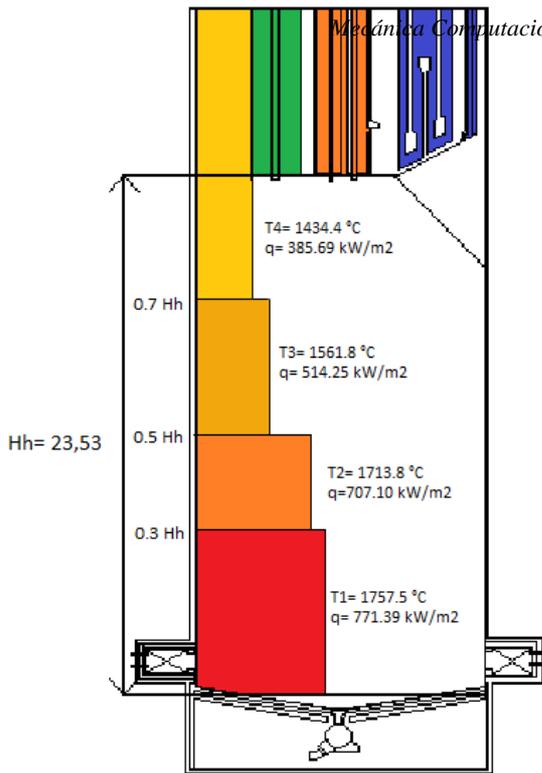


Fig. 4 Resultados del cálculo zonal a 75%

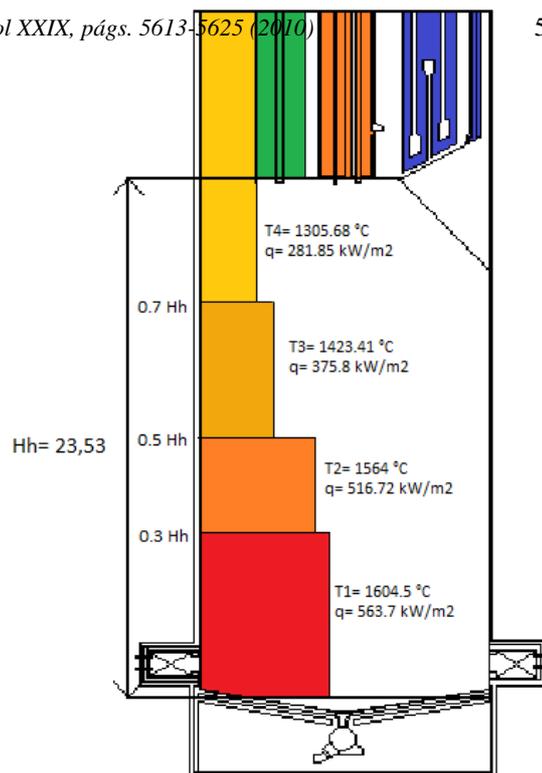


Fig. 5 Resultados del cálculo zonal a 50%

Por otro lado, aplicando el método zonal y el método de Gurvich para el cálculo de la temperatura en la salida del horno, se tienen los siguientes resultados a cargas parciales (ver tabla 3).

Tabla 3. Datos del generador de vapor dados por el fabricante (CFE, 2008) y última fila temperatura en salida del hogar obtenido con el método de Gurvich

Carga Térmica	MRC%	100%	75%	50%
Gasto de combustible, T/H	86.22	77.42	59.24	41.97
Eficiencia térmica, %	89.0	89.02	89.16	88.87
Coficiente de exceso de aire en la salida del hogar, %	5.0	5.0	5.0	15.0
Temperatura de los gases a salida del hogar (FABRICANTE), °C	1202.0	1174.0	1074.0	948.0
Temperatura de los gases a salida del hogar (METODO GURVICH), °C	1397.51	1347.12	1240.5	1102.62
Temperatura de los gases a salida del hogar (METODO ZONAL), °C	1612.67	1554.06	1434.4	1305.68

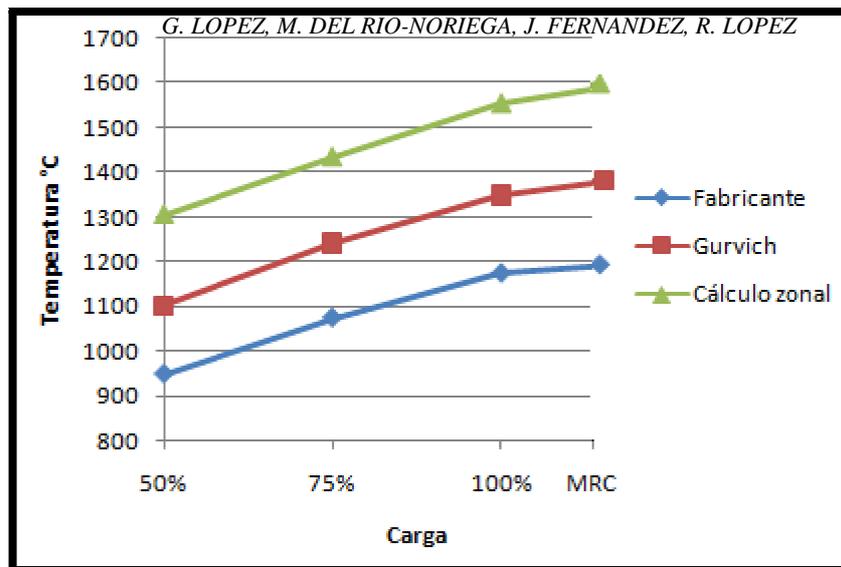


Figura 6. Temperatura en la salida del horno a cargas parciales.

En cuanto a la temperatura de salida del horno a carga térmica 100%, para fines de comparación con los resultados del cálculo zonal se usa el valor de la temperatura de salida del horno de 1433 °C, calculado en la tesis de maestría “Análisis de la formación de NOx en un generador de vapor de 350 MW quemando combustóleo desarrollado por el Ing. Juan Antonio Jiménez García”. En este trabajo de tesis se aplica la metodología del profesor A. M. Gurvich, la cual es presentada en este trabajo.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la metodología de cálculo de la temperatura en la salida del horno y el cálculo térmico en las diferentes zonas del horno (cálculo zonal). Los cálculos fueron realizados para un generador de vapor de 350 MW quemando combustóleo y a cargas parciales.

La diferencia entre la metodología de cálculo de la temperatura a la salida del horno y la metodología de cálculo térmico zonal, es que la primera sólo proporciona la temperatura a la salida del horno y la segunda permite conocer las diferentes temperaturas que existen a diferentes alturas o zonas del horno, incluyendo la temperatura en la salida del horno. Por lo consiguiente, se hizo una comparación de los resultados obtenidos de estas dos metodologías de cálculo térmico en cuanto a la temperatura de salida del horno, considerando una carga de 100%, obteniendo una temperatura a la salida del horno de 1530.34 °C para el cálculo zonal y una temperatura de 1433°C para la metodología de cálculo de la temperatura en la salida del horno, encontrando una pequeña diferencia de 96.64 °C, que corresponde a un error relativo de 6.33%. Por otro lado, se calcularon las temperaturas a la salida del horno a cargas parciales y se compararon con las temperaturas a la salida del horno reportadas por el fabricante.

La temperatura de salida del horno es fundamental para calcular las superficies de los elementos siguientes de la caldera.

REFERENCIAS

A. G. Blokh. *Heat Transfer in steam boiler furnaces*. Central Boiler and Turbine Institute, Leningrad, USSR, 1988.

CFE (Comisión Federal de Electricidad). *Instructivo de Operación y Parámetros del proceso térmico del Generador de Vapor de la central termoeléctrica Villa de Reyes*. México D.F. 2008.

G. M. Karan, et al. *Cálculo térmico de calderas (Método normativo)*. Sankt-Petersburg, CKTI-VTI, 1998. En ruso.

I. T. Shvets, et al. *Heat Engineering*. Fourth edition. Editorial MIR, Moscú Rusia 1987.

Jiménez García J. A. *Análisis de la formación de NOx en el generador de vapor de 350 MW quemando combustóleo*. (Tesis de Maestría en Ciencias de Sistemas energéticos). México D.F. 2008.

Siegel Robert, R. Howell J. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Fourth Edition. Editorial Taylor and Francis. U. S. A., 2002.

Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Transferencia de calor*. Sexta Edición. Editorial McGraw-hill. U.S.A. 2009.