



APLICACIONES INDUSTRIALES

Balance térmico de hornos de panaderías con el empleo de gas como combustible

Manuel Plá Duporté

Mayo del 2001

Resumen / Abstract

En el trabajo se muestra un método para la evaluación térmica de los hornos criollos de panadería, el cual permite calcular todas las pérdidas de calor, la eficiencia y el consumo específico de combustible. Mediante este método se pueden realizar ajustes de aquellos factores que provocan un incremento en el consumo de combustible de dichos hornos y analizar las modificaciones y operaciones necesarias para lograr elevar la eficiencia y que sea factible la sustitución del gasoil por gas manufacturado.

La evaluación realizada a estos hornos aporta datos hasta ahora desconocidos por ser esta la primera vez que se realiza un estudio usando gas manufacturado; pues en los realizados anteriormente el combustible empleado ha sido diesel. Se llevó a cabo con la ayuda de un programa de computación en Visual Basic y un programa en Excel que permitieron el análisis de variantes, para la más adecuada valoración técnico económica que permita la toma de decisiones correctas. Palabras claves: Balance térmico, horno, gas manufacturado, eficiencia.

In the work an analysis of the feasibility of the substitution of gas-oil for manufactured gas in the net of bakeries of the City of Havana is made. It is carried out the energy evaluation of a national oven which uses manufactured gas as fuel. This allowed to obtain the different energy losses that take place in the same one, their efficiency and the specific consumption of energy.

This evaluation is carried out for the first time in a national oven using this type of fuel and it was carried out with the help of a calculation program in Visual Basic and a program in Excel that allowed the analysis of variants, all that with the goal of obtain the appropriate economic technic valuation that allows the taking of correct decisions.

Key words: Thermal balance, oven, manufactured gas, efficiency.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es el primero de dos artículos relacionados con la evaluación térmica de hornos criollos de panaderías y su análisis económico durante la sustitución de gasoil por gas manufacturado en la red de panaderías de Ciudad de La Habana.

En los últimos años gracias a una certera política energética aplicada por la dirección del país, que incluye la exploración y explotación de yacimientos petrolíferos, la extracción nacional de crudo se ha incrementado; y se ha logrado utilizar con diferentes fines el gas acompañante de los pozos de petróleo que antiguamente se expulsaba a la atmósfera. Este gas se ha comenzado a emplear en la producción de gas manufacturado lo que ha permitido incrementar la disponibilidad del mismo.

Esta nueva situación permitió suministrar gas manufacturado a un determinado grupo de panaderías durante las horas de la noche y la madrugada en las cuales el consumo de la población disminuye considerablemente y sustituir de esta forma al gasoil que es el combustible que emplean las panaderías de Ciudad de La Habana.

Este trabajo tiene los siguientes objetivos:

- La aplicación de una metodología para el análisis térmico de los hornos de las panaderías a partir del consumo de gas manufacturado, lo cual incluye un programa en Visual Basic y uno en Excel para su cálculo y análisis de variantes.
- Determinar las pérdidas de energía que se producen en los hornos criollos, así como su eficiencia y consumo específico de combustible cuando emplean como combustible gas manufacturado.

DESARROLLO.

Para la realización de este trabajo se hizo un balance térmico del horno para lo cual se llevaron a cabo mediciones en una panadería, ello requirió el empleo de los siguientes instrumentos de medición:

Tabla 1 Instrumentos de medición empleados en el balance del horno.

Instrumentos	Cantidad
Milivoltímetro registrador (0-100) mV.	1
Termopar industrial(0-600)°C.	1
Termopar forrado para medir la temperatura en la bandeja.	1
Maleta de mediciones de los parámetros de la combustión.	1
Registrador de temperatura ambiente.	1

Los parámetros a medir se presentan a continuación:

Tabla 2 Parámetros a medir para la realización del balance.

Parámetros a medir. Contenido	Nomenclatura	Mediciones (%)
DEL COMBUSTIBLE.		
1. Metano	CH ₄	38
2. Nitrógeno	N ₂	7,52
3 Hidrógeno	H ₂	34,76
4. Oxido de carbono.	CO	6,43
5. Dióxido de carbono	CO ₂	9,47
6. Oxígeno	O ₂	0,29
7. Propano	C ₃ H ₈	0.19
8. Propileno	C ₃ H ₆	2,73
9. Isobutano	IC ₄	0,33
10. Normalbutano	nC ₄	0,14
DE LOS GASES DE ESCAPE		
11. Oxígeno	O ₂	2
12. Oxido de Carbono	CO	0.2
13. Dióxido carbono	CO ₂	5
14. Nitrógeno	N ₂	78,73
15. Metano.	CH ₄	0
16.Temp. de gases en la salida (°C).	t _g	270
17. Temperatura del aire (°C).	t _a	30
OTROS PARAMETROS		
18.Temp de la cámara del horno(°C).	t _b	280
19.Temp de salida de la bandeja(°C).		148.58
20.Temp de la pared interior al inicio del calentamiento(°C).		110
21.Temp. de la pared interior al finalizar el calentamiento(°C).		310
22.Temp de la pared interior al finalizar el enfriamiento(°C).		173
23.Consumo de combustible(m ³ /s).	B	0.0025
24.Tiempo de trabajo del quemador (h.). (T _t)		12
25.Tiempo real de asentamiento (min.)		70
26. Ancho mínimo de la abertura		300
27.Dimensiones de la abertura (ancho, largo)[mm].		700,500
28.Espesor de la pared donde se encuentra la abertura(mm).		150
29. Tipo de abertura		rectangular
30. Masa de la bandeja(kg.).	m _b	1

En los puntos 20, 21 y 22; las temperaturas de la pared interior del horno se toman iguales a la temperatura del horno para cada período allí analizado. [1]

Cálculo de la combustión. [2]

Este cálculo se realiza para el horno criollo. La metodología empleada puede ser utilizada para el balance en los hornos estrellas ya que las características son similares. Se ha escogido el horno criollo pues se encuentra más difundido en todo el país.

Hornos criollos.

1. Valor calórico bajo del combustible

$$Q_{bc} = 107,98 H_2 + 126,36 CO + 233,83 H_2S + 0,01 \sum Q_{bc} C_m H_n C_m H_n \text{ (KJ/m}^3\text{gas)} \dots (1)$$

2 Volumen teórico de aire:

$$V^o_a = 0,0476 [0,5(CO + H_2) + 1,5 H_2S - O_2 + \frac{m+n}{4} C_m H_n] \text{ (m}^3\text{de aire/m}^3\text{gas)}. \dots (2)$$

$$V^o_a = 5,360 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

Nota: En lo sucesivo, tal y como aparece en las ecuaciones (1) y (2) en el presente epígrafe las unidades se refieren a la unidad de volumen del gas manufacturado.

3 Volumen de gases triatómicos:

$$V_r = 0,01 (CO_2 + CO + H_2S + \sum m (C_n H_m)); \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (3)$$

$$V_r = 0,5384 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

4. Volumen teórico de nitrógeno:

$$V^o_N = 0,79 V^o_a + 0,008 N_2 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} \dots (4)$$

$$V_oN = 4,294 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

5. Volumen teórico de vapor de agua:

$$V^o_{H_2O} = 0,01 (H_2 + H_2S + \sum (n/2) (C_n H_m)) + 0,124 W_g + 3,27 V^o_a; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (5)$$

$$V^o_{H_2O} = 1,396 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

6. Volumen teórico de los gases producto de la combustión:

$$V^o_g = V_r + V_oN + V_{H_2O}; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (6)$$

$$V^o_g = 6,228 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

7. Coeficiente de exceso de aire:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \left(\frac{3,76 (O_2 - 0,5 CO - 0,5 H_2 - 2 CH_4)}{100 - CO_2 - CO - O_2} \right)} \dots (7)$$

$$\alpha = 1,08$$

8. Volumen real de gases:

$$V_g = V^o_g + (\alpha - 1) V^o_a 1,0327; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (8)$$

$$V_g = 6,69 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

9. Volumen real de gases secos:

$$V_{gs} = V_r + V^o_N + (\alpha - 1) V^o_a; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (9)$$

$$V_{gs} = 5,28 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

10. Volumen real de dióxido de carbono:

$$V_{CO_2} = CO_2 V_{gs}/100; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (10)$$

$$V_{CO_2} = 0,264 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

11. Volumen real de monóxido de carbono:

$$V_{CO} = CO V_{gs}/100; \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}. \dots (11)$$

$$V_{CO} = 0,010559 \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)}.$$

12. Volumen real de nitrógeno:

$$VN_2 = (100 - CO_2 - CO - O_2) V_{gs}/100; (m^3/m^3). \dots (12)$$

$$VN_2 = 4,90 \quad (m^3/m^3).$$

13. Volumen real de hidrógeno:

$$VH_2 = H_2 V_{gs}/100; (m^3/m^3). \dots (13)$$

$$VH_2 = 0 \quad (m^3/m^3).$$

14. Volumen real de metano:

$$VCH_4 = CH_4 V_{gs}/100; (m^3/m^3). \dots (14)$$

$$VCH_4 = 0,000 \quad (m^3/m^3).$$

15. Volumen real de oxígeno:

$$VO_2 = O_2 V_{gs}/100; (m^3/m^3). \dots (15)$$

$$VO_2 = 0,105591 \quad (m^3/m^3).$$

16 Volumen real de vapor de agua:

$$VH_2O = V^o H_2O + 0,0327 (\alpha - 1) V^o a; (m^3/m^3). \dots (16)$$

$$VH_2O = 1,410 \quad (m^3/m^3).$$

17. Volumen total de gases:

$$V_{tg} = VCO_2 + VCO + VN_2 + VH_2 + VCH_4 + VO_2 + VH_2O; (m^3/m^3). \dots (17)$$

$$V_{tg} = 6,690 \quad (m^3/m^3).$$

18. Calor específico del aire:

$$Ca = (0,31 + 2,98 \cdot 10^{-5} ta + 3,8 \cdot 10^{-9} ta^2 - 2,56 \cdot 10^{-12} ta^3) 4,1868; (kJ/m^3 \text{ } ^\circ C). \dots (18)$$

$$Ca = 1,302 \quad (kJ/m^3 \text{ } ^\circ C).$$

19. Entalpía del aire teórico:

$$Ia = ta Ca V^o a; (kJ/m^3). \dots (19)$$

$$Ia = 209,29; (kJ/m^3)$$

20. Calor específico de los gases:

$$Cg = (0,34 + 4,31 \cdot 10^{-5} tg + 1,3 \cdot 10^{-8} tg^2 - 6,42 \cdot 10^{-12} tg^3) 4,1868; (kJ/m^3 \text{ } ^\circ C). \dots (20)$$

$$Cg = 1,476 \quad (kJ/m^3 \text{ } ^\circ C).$$

21. Entalpía de los gases a la salida:

$$Ig = tg Cg V^o tg; (kJ/m^3). \dots (21)$$

$$Igs = 2665,53 \quad (kJ/m^3)$$

2.4 Balance térmico del horno.

La metodología para realizar el balance térmico del horno es basada en la propuesta por Tanquero, N. y otros [3].

Para la realización del balance se tomaron en consideración varias premisas:

- Se ha considerado una producción de 18 000 panes, para lo cual se emplean 642 bandejas de 28 panes cada una.
- El tiempo total de trabajo continuo fue de 12 horas. Esto es necesario considerarlo puesto que el flujo de gas es continuo y en las condiciones actuales este no se interrumpe totalmente en ningún momento.

Calor disponible.

El calor disponible coincide con el valor calórico bajo del combustible gaseoso (Q_{bc}) que es el gas manufacturado

$$Q_d = Q_{bc} = 21253,813 \quad (kJ/m^3). \dots (22)$$

Pérdida de calor con los gases de escape:

$$Q_2 = (I_{gs} - \alpha_{ge} I_a) (1 - q_4/100) \dots (23)$$

Pérdida de calor por incombustión química:

$$Q_3 = V_{gs} (30,2 \text{ CO} + 25,8 \text{ H}_2 + 855 \text{ CH}_4) \dots (23)$$

Las pérdidas por incombustión mecánica (Q4), para combustibles gaseosos no existen y por lo tanto su valor se toma igual a cero.

Pérdida de calor por convección al exterior: [4]

Este es un caso de convección natural de cada pared al aire.

Coefficiente de transferencia de calor (a):

$$\alpha = N_u \lambda / D; \text{ (kW/m}^2 \text{ °C)}$$

donde:

N_u : Número de Nusselt.

λ : Coeficiente de conductividad térmica; (kW/m °C)=0,0267

D: Dimensión característica de la pared (altura); (m)=3

Para paredes verticales:

Si: $10^3 < Gr Pr < 10^8$; régimen laminar y $Nu = 0,695 Gr^{0,25}$.

$Gr Pr > 10^9$; régimen turbulento y $Nu = 0,133 Gr^{0,33}$.

$$Gr = 1,78 \cdot 10^{12} > 10^9 \Rightarrow Nu = 1467,2$$

$$\alpha = Nu \lambda / h; \text{ (W/m}^2 \text{ °C)} = 9,79 \text{ (W/m}^2 \text{ °C)}$$

$$Q_5 = \alpha F \Delta t; \text{ (kW)}. \dots (27)$$

donde:

F: Área exterior de la pared; (m²)

Δt : Diferencia de temperatura entre la pared y el aire; (°C)

Este cálculo se realiza para cada pared vertical, pues generalmente sus características geométricas son diferentes.

Para el techo se emplea la siguiente expresión

$$Q_5 = (N_u \lambda A_t \Delta t) / (A_t / P_t) \dots (28) \quad [5]$$

Donde: A_t : Área del techo

P_t : Perímetro del techo.

Pérdida de calor por aberturas:

$$Q_6 = 5,6 \cdot 10^{-11} (t_h + 273)^4$$

donde:

t_h : Temperatura de la cámara del horno; (°C)=280

S: Área de la abertura; (m²)=1,5

F: Factor de radiación total =0,273

Para aberturas rectangulares:

$$F = \log(0,99 + 1,6 DX - 1,11 DX^2 + 0,41 DX^3 - 0,000007 DX^4 + 0,0032 DX^5 + 0,000573 DX^6 - 0,0000554 DX^7).$$

donde:

DX: relación entre el diámetro de la abertura (o ancho mínimo) y el espesor de la pared donde se encuentra.

Pérdidas de calor por salida de las bandejas del horno:

$$Q_7 = m_{b,xy} (t_b - t_a) C_b; \text{ (kW)}. \dots (30)$$

Donde:

t_a : Temperatura ambiente. (asumida como 27°C)

xy: número de bandejas = 642.

C_b : Calor específico del material de las bandejas

$$C_b = 2,2 \text{ KJ/Kg °C}$$

Pérdidas de calor por acumulación en las paredes:

$$Q_8 = m c_p \Delta t; \text{ (kW)}. \dots (31)$$

donde:

densidad de la pared; (kg/m³)=1200

m: masa de la pared; (kg.)=rV

cp = 0,96 KJ/ Kg °C

V: Volumen de cada pared.

Δt: diferencia entre las temperaturas medias de la pared al finalizar el periodo de calentamiento y al finalizar el periodo de enfriamiento; (°C)

$$\Delta t = (t_{mi} - t_{mf})$$

$$t_{mi} = (310+60)/2 = 185$$

$$t_{mf} = (173+40)/2 = 106,5$$

$$\Delta t = 78,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pérdidas de calor por salida del pan del horno:

$$Q_g = mps \text{ Ips xy } U_b ; (\text{kJ}). \dots(32)$$

donde:

mps: Masa de salida del pan; (kg)=0,05

Ips: Entalpía de salida del pan; (kJ/kg).

Ips = cpan (tp - ta); (kJ/kg)=209,7 ... (33)

Cpan: Calor específico del pan; (kJ/kg. °C)=2,33.

Ub: Unidades por bandeja. = 28

Pérdidas de calor no consideradas en el cálculo:

$$q_{10} = Pn (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9) \dots(34)$$

donde: q_i : Q_i/Q_d

Pn: Coeficiente de pérdidas de calor no consideradas en el cálculo. Se encuentra en el rango de 0,1-0,15.

El valor de Pn se ha tomado igual 0,15 debido a las características constructivas del horno, correspondiente a diseños muy antiguos y al estado en que se encuentra con algunas rajaduras, insuficiente arena que conforma el relleno del piso y otras deficiencias presentes en el trabajo de los operarios.

Eficiencia del horno:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10})$$

$$\eta = 34,13 \text{ } \%$$

22. Consumo específico de combustible:

$$b = \frac{BT_i}{\left[\frac{m_{ps} + m_{pe}}{2} \right] \cdot xy \cdot u_b} ; (\text{m}^3/\text{Kg pan}) \dots(35)$$

donde:

mpe: Masa de entrada del pan; [kg.]=0,057

b = 0,09464928 (m³/Kg pan)

A continuación se presenta resumidamente en forma tabulada los resultados del balance de energía realizado.

Tabla 4 Balance térmico del horno.

RESULTADOS DEL BALANCE EN EL HORNO				
	KJ/m ³	KJ/s	KJ	%
Q _d	21253,813	54,409	2350501,68	100
Q ₂	2438,785	16,243	269720,225	11,47
Q ₃	40,410	0,103	4469,022	0,19
Q ₄	0	0	0	0
Q ₅	2132,8125	5,46	235872,0	10,03
Q ₆	837,890	2,145	92664,0	3,94
Q ₇	1954,003	5,002	216097,20	9,19
Q ₈	633,471	1,621	70056,90	11,62
Q ₉	2301,32	5,891	254508,61	10,83
Q ₁₀	1551,52	3,972	171586,62	8,59

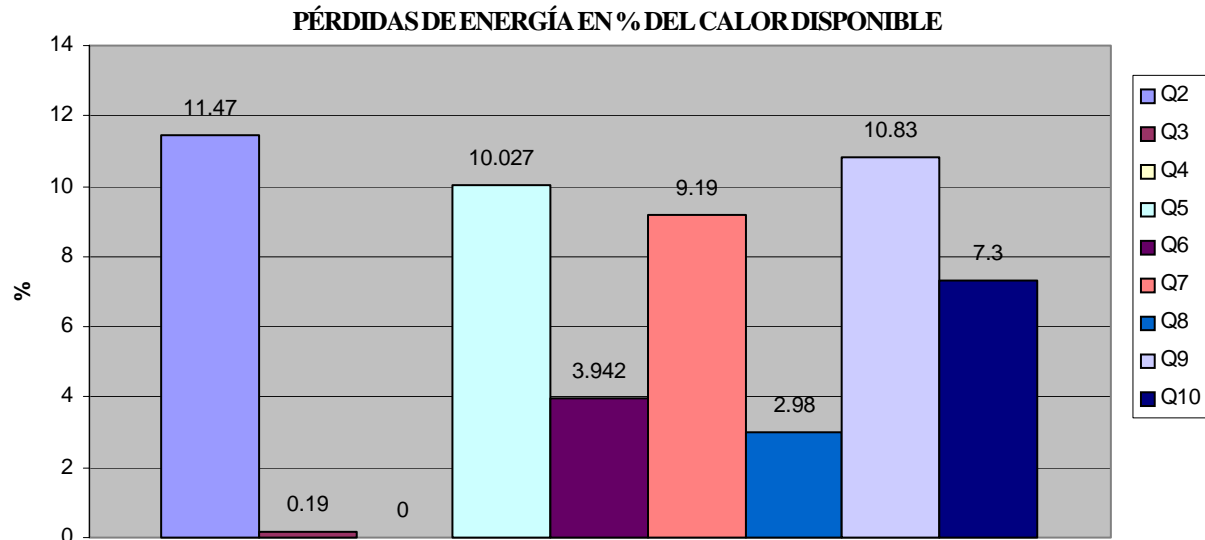


Figura 1 Pérdidas de energía en %.

Estos resultados se presentan como una muestra obtenida bajo las condiciones especificadas en los datos iniciales.

Entre las diferentes condiciones que pueden presentarse e influir en los resultados del balance y por lo tanto del rendimiento del horno están:

Variación en:

- La composición del gas manufacturado.
- La cantidad de pan a producir.
- El tamaño de las bandejas.
- El número de aberturas del horno.
- El flujo de gas disponible.

Los resultados anteriormente mostrados, fueron obtenidos con la ayuda de un software realizado en Visual Basic, un lenguaje de alta programación y orientada a objeto, además una hoja de cálculo en Excel que permite obtener diferentes balances para las distintas condiciones que se pueden presentar en la práctica, así como los gráficos de pérdida de calor y rendimiento. [1]

CONCLUSIONES

Se logró realizar el balance de energía mediante la aplicación por primera vez de la metodología descrita con gas manufacturado como combustible, se determinaron las principales causas de pérdidas de energía y mediante el uso de los programas en Visual Basic y Excel se pueden analizar diferentes variantes en breve tiempo.

Las principales pérdidas de calor son:

Pérdida de calor por acumulación en las paredes. (Q8)

Pérdida de calor con gases de escape (Q2)

Pérdida de calor por salida del pan del horno (Q9)

Pérdida de calor por salida de las bandejas del horno (Q7)

Todas estas pérdidas son inevitables y poco se puede hacer para disminuirlas.

Las pérdidas por incombustión mecánica son cero y por incombustión química son pequeñas lo cual revela las ventajas del empleo de gas como combustible con respecto al gasoil

BIBLIOGRAFÍA

1. Plá, M. Sustitución de gasoil por gas manufacturado en los hornos de panaderías de Ciudad de La Habana. Trabajo en opción al título de Master en Energía Térmica. ISPJAE. 2001.
2. Tanquero, N. y otros. Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor
3. Tanquero, N. y otros. "Evaluación térmica de hornos criollos de panaderías". Revista Ingeniería Energética, Vol. X, No. 4, 1989.
4. Isachenko, B.P: Transferencia de calor y masa, MIR, Moscú, 1981
5. Cengel, Yunius A. Heat transfer a practical approach, University of Nevada, Reno, 1998.

Autor

Manuel Plá Duporté

Ingeniero Mecánico, Master en Energía Térmica.

Profesor Auxiliar, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER)

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. (ISPJAE), Ciudad de La Habana