

Incremento de productividad por recuperación de calor en gases de chimenea de un horno de cubilote

Héctor Daniel Mejía , Claudia Silva** , Ricardo Aristizábal****

Resumen

Sobre la base de la primera ley de la termodinámica se realiza el balance de calor para dos cubilotes típicos y para el cubilote de la Universidad de Antioquia, en este último, antes y después de ser instalado y puesto a punto el sistema de recuperación de calor, que opera con dos regeneradores de lecho empacado. Con los resultados obtenidos en el prototipo eco-eficiente se demuestran las ventajas de trabajar un cubilote con sistemas que recuperen calor de los gases de chimenea, resaltando en este caso, el incremento en la productividad (52,4%) y en la temperatura del metal de salida (7,3%), además del cumplimiento de las normas ambientales vigentes en Colombia. Se destaca la necesidad de recuperar el calor de los gases de salida en todos los equipos donde se usan sistemas de combustión.

----- *Palabras clave:* horno de cubilote, recuperadores de calor, eficiencia térmica, balance de calor.

Productivity increasing by heat recovery from chimney gases in a cupola furnace

Abstract

Based on the first law of thermodynamics, the heat balance is done for two typical cupolas and the University of Antioquia cupola, for the last after and before installing the heat recovery system composed by two packed bed regenerators. With the results obtained in the Eco-efficient Prototype the advantages of working a cupola with heat recovery systems for chimney gases are demonstrated. It is remarkable in this case the increase in both the productivity (52,4%) and the metal output temperature (7,3%). Moreover the fulfillment of the present environmental norms in Colombia is outstanding. It is necessary recover heat from exit gases in all the equipment where combustion systems are used.

----- *Key words:* cupola furnace, heat regenerator, thermal efficiency, heat balance.

* Profesor titular. Universidad de Antioquia. danme@udea.edu.co.

** Estudiante de Ingeniería Metalúrgica. ecmsv438@udea.edu.co.

*** Estudiante de Maestría en Ingeniería. Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas GIPIMME. ereas683@udea.edu.co.

Introducción

Es bien conocido el hecho de que los equipos térmicos donde se desarrolla un proceso de combustión, como calderas, secadores, hornos de todo tipo, etc., producen enorme desperdicio de energía cuando arrojan a la atmósfera sus gases a temperaturas elevadas.

Tómese el ejemplo de un horno de cubilote convencional, que puede considerarse como el horno promedio usado por las pequeñas y medianas industrias (PYMES) del subsector fundición, no sólo en Colombia sino también en Centroamérica y los países del Pacto Andino.

Este horno (figura 1), en su forma más simple, consta de un cilindro metálico recubierto interiormente con material refractario, cerrado por el fondo. En la parte inferior se coloca una cantidad de coque¹ (cama de coque) que genera el calor suficiente para fundir el hierro, al reaccionar con el oxígeno del aire que se introduce por la caja de viento y luego es distribuido uniformemente a través de las toberas. En la parte superior está la puerta de carga, por donde se introducen las materias primas —chatarra de metal, coque suplementario, fundentes (caliza) y aleantes—. El metal fundido se extrae por un agujero denominado piquera de metal, ubicado en el fondo del horno. La escoria se separa del metal fundido por diferencia de densidades y sale por otra piquera, que está más alta que la anterior, mientras los gases producto del proceso salen por la chimenea.

Dos hornos nacionales de este tipo para uso industrial, de 2 ton/h de capacidad productiva de metal fundido, se caracterizaron mediante muestreo isocinético de gases de chimenea, medición de insumos, productos y temperatura del metal de salida, en un proyecto donde participó la Universidad de Antioquia [1]. Los valores prome-

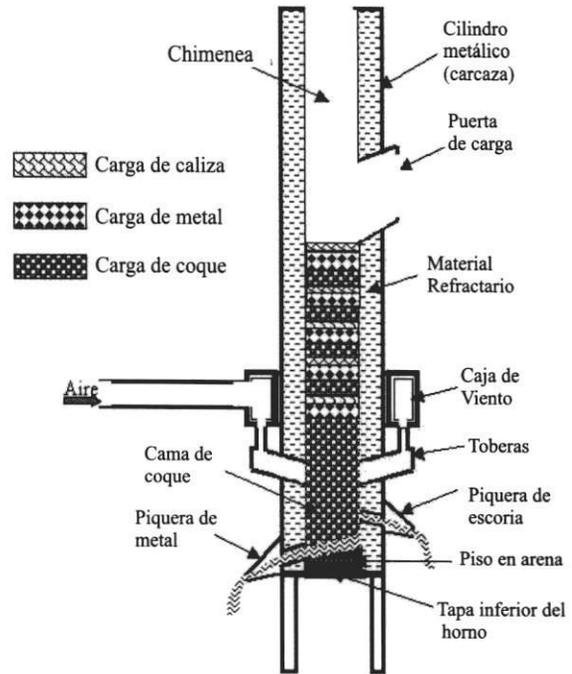


Figura 1 Esquema de un cubilote convencional

dio, provenientes de estos trabajos se muestran en la tabla 1.

Los datos consignados en la tabla 1 se utilizaron para calcular los flujos de calor asociados al proceso y las eficiencias del mismo mediante las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), cuyas variables están definidas al final de este artículo. Los resultados se muestran en la tabla 2 y se comparan con datos provenientes de la literatura clásica de cubilote [2] para un horno de 20 ton/hora, 1,676 m de diámetro interior, soplo a 177 °C y gases de salida a 454 °C. Para este último los índices de eficiencia se calculan teniendo en cuenta que el coque aporta el 94,54% del calor total de entra-

1 Combustible del horno que se obtiene del carbón mineral (hulla) por combustión controlada, lo que eleva sensiblemente su poder calorífico.

Tabla 1 Valores promedio de la caracterización de dos cubilotes industriales

<i>Especificaciones</i>	<i>Valores promedio</i>
Caudal de gases en chimenea	110 m ³ N/min.*
Composición promedio de los gases de salida sin considerar la humedad	16,99 %CO ₂ ; 5,43 %CO; 0,99 %O ₂ ; 76,59 %N ₂
Relación de combustión	75.825%
Temperatura promedio de gases	922,4 °C
Consumo de coque	589,2 kg/h
Temperatura del metal en piqueta	1.500 °C

* metros cúbicos normales por minuto

Nota. La relación de combustión se define como
$$N_v = \left(\frac{\%CO_2}{\%CO_2 + \%CO} \right) \times 100$$

Tabla 2 Flujos de calores asociados al proceso de fundición de los dos cubilotes estudiados, comparados con los datos provenientes de la literatura

<i>Símbolo</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Valores</i>	
		<i>Cubilote de la literatura</i>	<i>Promedio de cubilotes estudiados</i>
Q_c	Calor generado por el coque	13'260.000 kcal/h	4.360.080 kcal/h
Q_{gs}	Calor sensible en los gases de salida	1.645.405 kcal/h	2.130.641,41 kcal/h
Q_{gl}	Calor latente en los gases de salida	4.537.920 kcal/h	1'036.641,41 kcal/h
Q_u	Calor útil	5.766.940 kcal/h	638.017,3 kcal/h
E_f	Eficiencia de fusión	43.5%	14.6%
P_e	Pérdidas energéticas asociadas a los gases de escape	47%	72,6%

da, mientras el 5,46% restante proviene del calor sensible del aire del soplo y de las reacciones exotérmicas de oxidación de algunos elementos presentes en la carga metálica.

$$Q_c = C_c W \quad (1)$$

$$Q = m C_p \Delta T \quad (2)$$

$$E_f = \frac{Q_u}{Q_c} * 100 \quad (3)$$

$$P_e = \frac{Q_{gs} + Q_{gl}}{Q_c} * 100 \quad (4)$$

El prototipo

En el año 1994, la Federación de Industrias Metalúrgicas, Fedemetal, impulsó un proyecto que culminó con el Primer Congreso Nacional de Fundición [3], mediante el cual catorce empresas en todo el país fueron visitadas por un grupo de cinco ingenieros brasileños expertos en fundición y cinco profesores universitarios, en calidad de homólogos nacionales.

En este proceso se hizo especial hincapié en los problemas ambientales del subsector, especialmente en el caso de los hornos de cubilote, lo cual hizo que Fedemetal y la fundación Propel (Promoción de la Pequeña Empresa Eco-eficiente Latinoamericana, actualmente fusionada con

Fundes —Fundación para el Desarrollo Sostenible— ambas de origen suizo), financiaran otro proyecto [1] en el cual se logró diseñar un equipo a escala industrial que además de disminuir las emisiones atmosféricas recuperaba calor de los gases de salida y aumentaba significativamente la eficiencia térmica del cubilote.

Sin embargo, los empresarios comprometidos no se resolvieron a construir los equipos diseñados, en atención a que no existían experiencias previas que pudieran validar su operación en alguna parte del mundo.

La Universidad propuso entonces a Propel la construcción de un prototipo para aplicarle al horno experimental que existía en el taller de fundición de la Universidad de Antioquia, cuyas dimensiones se pueden ver en la tabla 3.

La construcción se realizó aceleradamente, entre febrero y mayo de 1996, gracias al apoyo decidido de Propel en la parte financiera [4].

Tabla 3 Dimensiones de las partes del prototipo eco-eficiente de la Universidad de Antioquia

Parte del prototipo		Valores
Cubilote	Diámetro interior	31 cm
	Producción	200 kg/h
	Soplo	Frío
Cilindros del recuperador de lecho empacado	Diámetro interior	30 cm
	Altura	70 cm
Elementos de relleno (bujes)	Diámetro exterior	5 cm
	Diámetro interior	2 cm
	Altura	5 cm

La sección de recuperación de calor (ver figura 2) consta de dos regeneradores de lecho empacado, cuyas dimensiones se encuentran en la tabla 3. Los gases calientes se dirigen a un acumulador, mediante una válvula de cuatro vías ①, de modo que transfieran su calor sensible a los elementos del lecho ②.

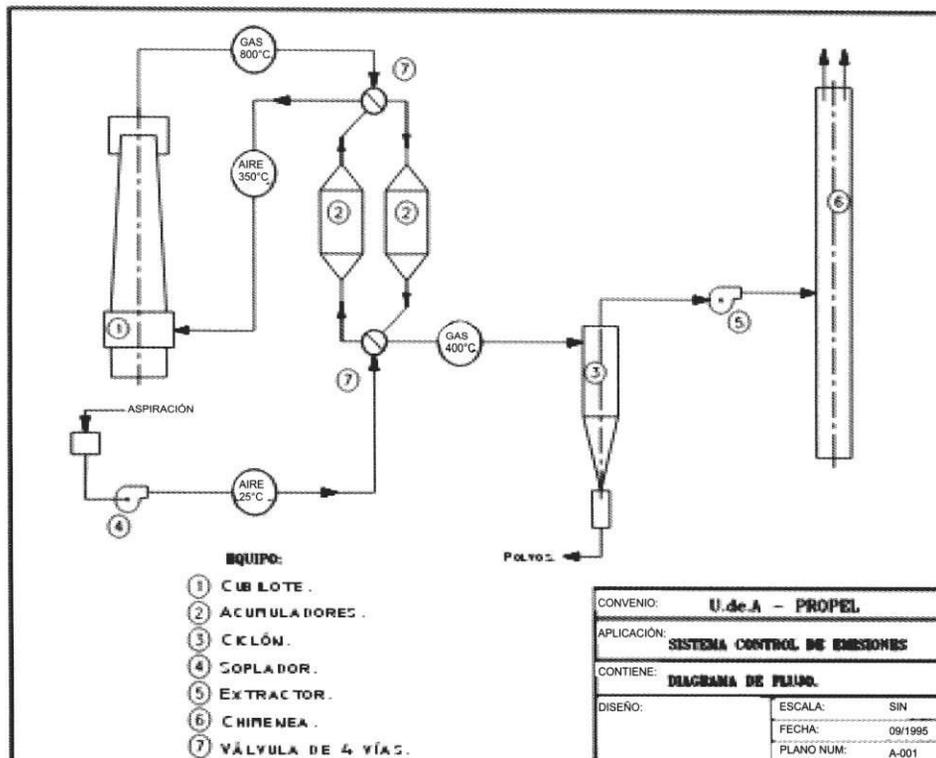


Figura 2 Esquema del prototipo eco-eficiente de la Universidad de Antioquia [3]

En este proceso, los gases bajan su temperatura desde 800 °C hasta aproximadamente 400 en su recorrido a través de los acumuladores, pasan por un ciclón de alta eficiencia ③ para retirar el material particulado y finalmente se expulsan a la atmósfera mediante un ventilador de extracción ⑤ a 125 °C aproximadamente. Simultáneamente por el otro regenerador, que ya se había calentado en un ciclo previo, se pasa el aire frío impulsado por el ventilador de sopló ④ para ser calentado a una temperatura de aproximadamente 350 °C, mediante el calor almacenado en el acumulador de calor ②. Este aire caliente se inyecta al horno por las toberas ①, mejorando su rendimiento térmico.

Periódicamente —cada 10 min. aproximadamente—, se intercambian los acumuladores mediante las válvulas de cuatro vías ⑦, de manera que siempre hay un acumulador en calentamiento y otro en enfriamiento.

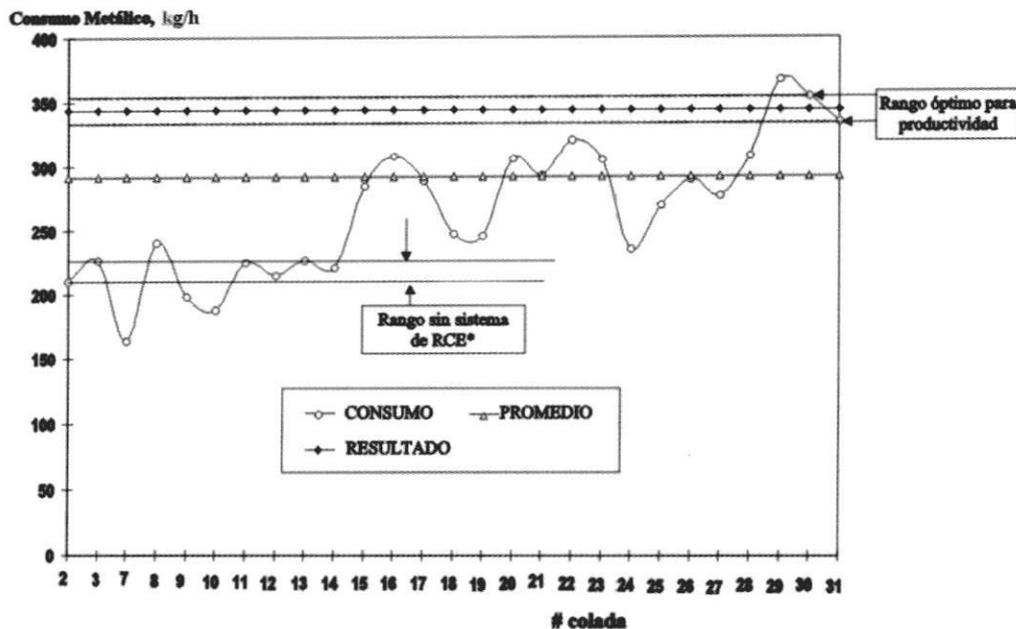
Las válvulas se operan manualmente mediante un mando mecánico; las temperaturas se leen

mediante termopares tipo K y los caudales se miden mediante caudalímetros tipo placa-orificio con manómetro inclinado.

Para la puesta a punto del prototipo, fue necesario realizar 16 coladas de prueba conducidas por la metodología Taguchi, con la participación del ingeniero MBA Javier Pradilla, profesor de la Universidad de los Andes y Director de Proyectos de PROPEL.

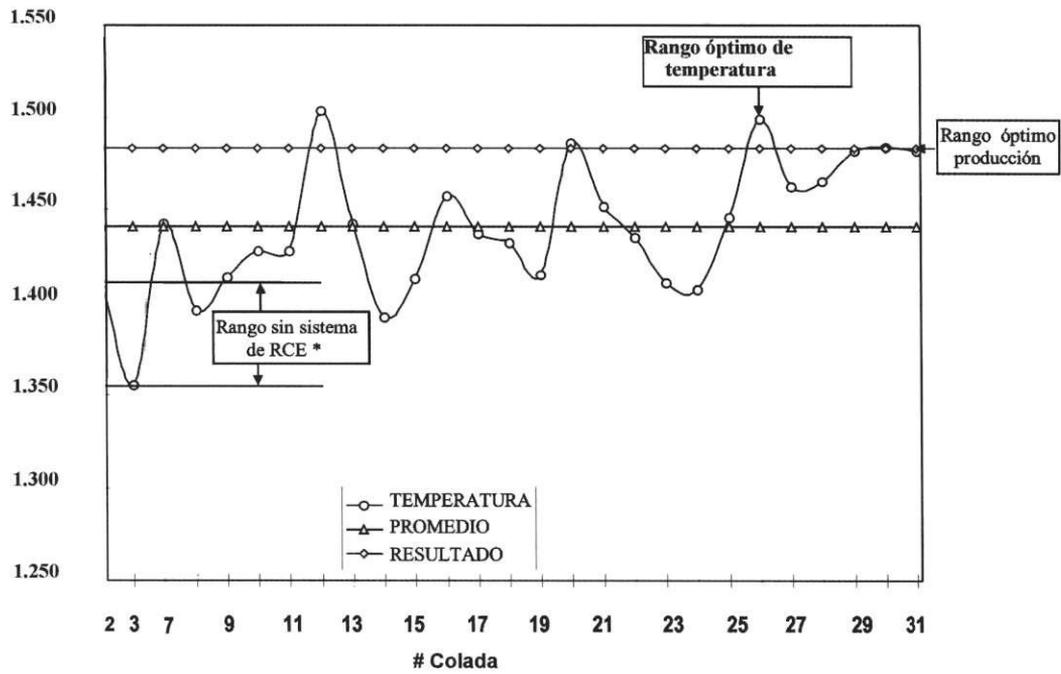
Finalmente, el prototipo denominado *El Dragón*, superó las metas esperadas, pues elevó la productividad en más del 50%, subió la temperatura del metal en 7% y logró cumplir la normatividad ambiental propuesta por el Ministerio del Medio Ambiente de agosto de 1994, además de superar ampliamente la norma vigente del decreto 02/82 del Ministerio de Salud Pública.

En las figuras 3, 4 y 5 se observan los resultados de las coladas correspondientes al proceso de puesta a punto del prototipo [4, 5].



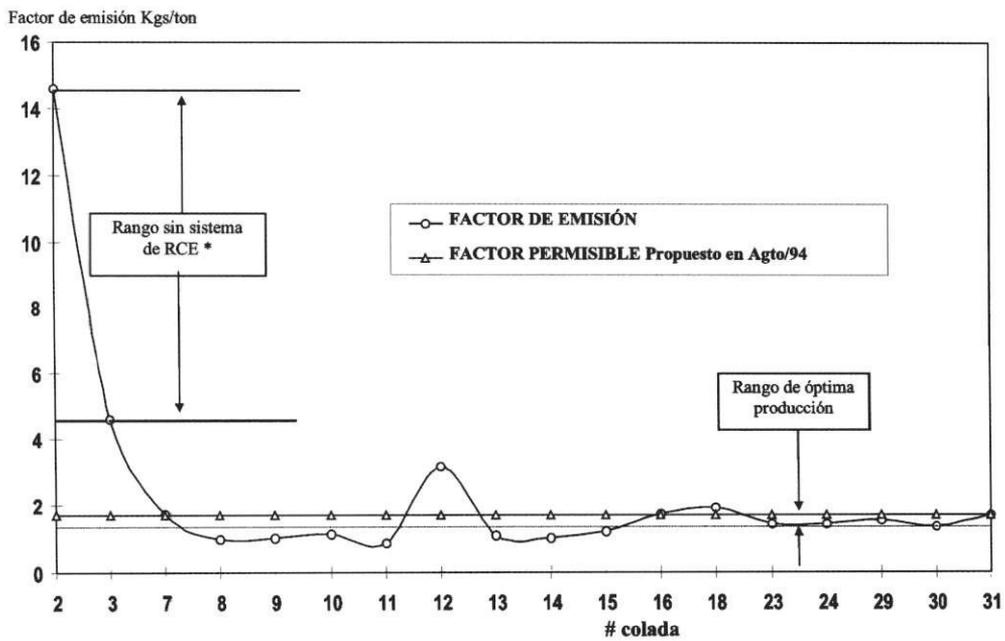
*RCE: Recuperación de calor y control de emisiones.

Figura 3 Aumento de la productividad con el prototipo “El Dragón” de la Universidad de Antioquia



*RCE: Recuperación de calor y control de emisiones.

Figura 4 Aumento de la temperatura del metal con el prototipo “El Dragón” de la Universidad de Antioquia



*RCE: Recuperación de calor y control de emisiones.

Figura 5 Mejoramiento del factor de emisiones del prototipo “El Dragón” de la Universidad de Antioquia

Balance energético

Con el fin de comparar el rendimiento térmico del prototipo, se realizó un balance energético considerando los resultados *antes* de instalar el sistema eco-eficiente y los obtenidos *después* de su implementación (balance termodinámico de primera ley).

Para la condición inicial, se instaló una chimenea directamente sobre el horno y se realizaron dos coladas de prueba (números 2 y 3), durante las cuales se tomaron muestras de gases y material particulado [4]. Para la condición *después*, se tomaron los datos de dos coladas comprobatorias (No. 30 y No. 31), realizadas luego de la puesta a punto del sistema eco-eficiente por el método Taguchi.

En la tabla 4, se muestran las cifras correspondientes a estas operaciones, considerando todas las sangrías de las respectivas coladas (períodos de calentamiento y estado estable).

Con los datos de la tabla 4 y las constantes que aparecen en la tabla 5, se calculan las cantidades de energía asociadas al proceso (ver tabla 6).

Con los datos de la tabla 6 se calculan las eficiencias y las pérdidas porcentuales del proceso, que se expresan en la tabla 7. La recuperación por soplo caliente se calcula con la relación (5).

$$R_{SS} = \frac{Q_{SS}}{Q_C} \times 100 \quad (5)$$

Análisis de datos y resultados

En lo concerniente a los hornos industriales, como puede observarse en la tabla 2, el calor generado por el coque en el horno referenciado en la literatura es mucho mayor, debido lógicamente, a que el nivel de producción es mucho más elevado y la cantidad de coque que debe utilizar es mayor; de igual manera el calor latente en los

Tabla 4 Datos promedios del prototipo eco-eficiente

<i>Magnitud</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor antes</i>	<i>Valor después</i>	<i>% Incremento</i>
Consumo de coque	kg/h	48,15	64,83	34,3
Relación coque-metal	%	22	19,4	-12
Soplo	m ³ N/min.	9,5	10,21	7,5
Temperatura de soplo	°C	25	398,3	No aplica
Producción de metal	kg/h	203,6	310,8	52,6
Temperatura metal	°C	1.382,5	1.483,3	7,3
Temperatura gases de salida	°C	794,7	163,85	-79,3
Caudal de los gases de salida	m ³ N/min.	8,89	18,94	113
Composición volumétrica de los gases de salida, base seca		% Antes	% Después	
	CO ₂	15,20	6,85	
	CO	0,90	0,75	
	O ₂	4,35	11,50	
	N ₂	79,62	80,90	

Nota. Los gases de salida en el prototipo sufren fuerte dilución con aire filtrado al sistema.

Tabla 5 Valores de las constantes usadas [2]

Constantes	Valores
Poder calorífico del coque	7.220 kcal/kg
Cp promedio del metal (intervalo 25 °C a 1.382,5 °C)	0,2106 kcal/kg*°C
Cp promedio del metal (intervalo 25 °C a 1.483,3 °C)	0,2083 kcal/kg*°C
Cp promedio gases a 794,7 °C (operación inicial)	0,2614 kcal/kg*°C
Cp promedio gases a 163,85 °C (operación final)	0,2436 kcal/kg*°C
Calor latente CO	2415 kcal/kg*°C

Tabla 6 Energía en la operación del prototipo eco-eficiente

Símbolo	Magnitud	Unidades	Valor antes	Valor después	% Incremento
Qc	Calor generado por el coque	kcal/h	Qca = 348.509,4	Qcd = 468.072,6	34,3
Qu	Calor útil	kcal/h	Qua = 58.207,1	Qud = 94.409,8	62,2
Qgs	Calor sensible en los gases de salida	kcal/h	Qsga = 146.272,0	Qsgd = 50.562,0	-65,4
Qgl	Calor latente en los gases de salida	kcal/h	Qlga = 14.441,7	Qlgd = 25.664,7	77,7
Qss	Calor sensible en el aire de soplado	kcal/h	No aplica	Qssd = 55.266,25	No aplica

Tabla 7 Eficiencia de fusión y pérdidas energéticas asociadas a los gases de salida del proceso

Símbolo	Magnitud	% Valor antes	% Valor después	% Incremento
Ef	Eficiencia	16,7	20,17	20,8
Pe	Pérdidas porcentuales	46,1	16,3	-64,6
Rss	Recuperación por soplado caliente	No aplica	11,8	No aplica

gases de salida aumenta debido a que el volumen de estos crece. Sin embargo, llama la atención el hecho de que el calor sensible sea menor, esto se debe probablemente a una columna de carga más alta y por ende a un aumento en el tiempo de residencia de los gases de salida y mayor precalentamiento de la carga descendente. Además, el tamaño de la carga es también de vital importancia, pero no se dispone de datos

suficientes para emitir un juicio a este respecto. También se observa la diferencia en eficiencia entre los hornos estudiados y el reportado por la literatura. Algunos factores asociados a esta diferencia se relacionan con lo anteriormente expuesto, concerniente al calor sensible de los gases de salida, pero el factor fundamental es geométrico, pues a medida que el diámetro de un cubilote aumenta, las pérdidas a través del re-

fractario disminuyen [6], esta observación es respaldada en la literatura, entre otros por Lillybec [7] y Stanek [8].

Con respecto al prototipo eco-eficiente, las primeras cifras destacables (ver tabla 4) son los incrementos en la producción y la temperatura del metal, de 52,6 y 7,3%, respectivamente. El análisis de varianza de esta última basado en la prueba F (no se realizó Duncan debido a que sólo existen dos tratamientos *antes* y *después*) concluye que existe diferencia estadística significativa entre las dos condiciones de trabajo. Para la producción no se realiza análisis de varianza debido a que existen muy pocos datos (uno por colada), sin embargo, el porcentaje de incremento habla por sí solo. El aumento en estas dos variables respuesta (producción y temperatura) está acompañado de mayor consumo de coque (34,3% ver tabla 6) aunque la relación coque/carga metálica sea menor. Esto se explica por el incremento mismo en la producción ya que el horno debe cargarse más rápido consumiendo más coque por unidad de tiempo pero menos por unidad de metal fundido. El cálculo de la cantidad de coque necesario en el horno *antes* del montaje del sistema de recuperación de calor manteniendo la eficiencia constante para alcanzar el mismo nivel de temperatura y producción que con el sistema de recuperación de calor, da como resultado que sería necesario un aumento en el 50% del combustible que correspondería a una relación coque/metal del 25%. Este incremento en la eficiencia se debe en parte al aceleramiento de las reacciones exotérmicas por aumento de la rata de sople en un 7,5%, pero indudablemente el calor recuperado a través del aire caliente, que alcanza 15,4% del calor generado por la combustión del coque, desempeña un papel muy importante en el mejor rendimiento térmico del equipo, lo cual está de acuerdo con la literatura [2], en donde se reportan aumentos en la productividad y la temperatura mediante la inyección de aire caliente, bien sea precalentados por energía externa o por sistemas de recuperación de calor del mismo proceso. En gran parte este beneficio se debe a que la cantidad de calor ro-

bada por el nitrógeno (que no colabora en la combustión y por el contrario actúa como un ladrón de calor) en los gases de salida es más baja, entrando en el sistema con una energía previa y disminuyendo la pérdida asociada a su calentamiento, lo que no ocurre cuando se utiliza sople frío.

El sople puede calentarse mediante energía externa pero es indudable que el aprovechamiento de la energía del mismo proceso es mucho mejor, ya que disminuye los costos.

Otra vía de análisis podría ser por medio del diagrama reticular del cubilote [9], pero infortunadamente no existe uno que se adapte al diseño y condiciones operativas del prototipo, además, el sople caliente desplaza el diagrama, lo cual dificulta enormemente su uso para comparar una operación de sople frío con otra de sople caliente.

Es de destacar igualmente, la apreciable reducción del calor perdido en los gases, que llega al 64,6%, cifra bastante inferior al 11,8% que se logra recuperar (ver tabla 7). Esto se explica por las altas pérdidas por radiación que se tienen a lo largo de los conductos, el ciclón y el extractor de gases. Un análisis exergético podría dar una explicación más rigurosa en este sentido, pero se sale del marco del presente artículo.

Contribuciones a la productividad

En el momento presente, el prototipo eco-eficiente ha logrado respaldar importantes aportes a la productividad de las empresas que usan horno de cubilote, a saber:

- El incremento en la producción horaria superior al 50%, con lo cual quedan demostrados los beneficios de aprovechar el calor de los gases de salida en un equipo donde se realizan procesos de combustión.
- La posibilidad de acceder a mercados de más alta exigencia tecnológica, como el hierro

nodular normalizado y los hierros de alta aleación, gracias al incremento de la temperatura del metal y los beneficios que ello trae sobre la composición química (como la reducción del contenido de azufre) y sobre los procesos de metalurgia en cuchara (como la nodulización). Esto brinda a las PYMES la posibilidad de competir exitosamente en nichos de mercado que antes estaban sólo al alcance de grandes empresas que operan con horno de inducción, de mayor costo tanto en inversión como en mantenimiento.

- El avance importante en las tecnologías nacionales apropiadas para control de emisiones encaminadas al desarrollo sostenible, las cuales permiten la subsistencia de las empresas con horno de cubilote, ante la creciente exigencia de las normas ambientales.
- La promoción de cultura investigativa para el desarrollo de sistemas similares que sean aplicables a otros tipos de hornos y equipos que usen la combustión como fuente de calor, tales como calderas, secadores, hornos de ladrilleras, etc., partiendo de la base que todos los equipos tienen su mayor pérdida térmica por la vía de los gases de salida.

Lista de variables utilizadas en las ecuaciones

Q_c : calor generado por el coque [kcal].

C_c : poder calorífico del coque. Para el caso presente se considera un poder calorífico promedio de 7.400 kcal/kg [1].

W : peso de coque que se carga en una hora.

Q : calor [kcal].

m : masa [kg].

C_p : capacidad calorífica promedio. Estos datos provienen de la referencia [2]. Para los gases 0,2659 kcal/kg^oK y para el metal fundido 0,2086 kcal/kg^oK que incluye el ΔH de fusión, el

calentamiento en estado sólido y el sobrecalentamiento en estado líquido.

E_f : eficiencia de fusión.

Q_u : calor útil [kcal].

P_e : pérdidas energética asociada a los gases de escape.

T : temperatura [°K].

Q_{gl} : calor latente en los gases de salida [kcal].

Q_{gs} : calor sensible en los gases de salida [kcal].

Bibliografía

1. Sáenz, Alejandro, et al. *Mejoramiento de la eco-eficiencia en el sub-sector de la fundición, proyecto de desarrollo empresarial patrocinado por Fedemetal, Propel y la Universidad de Antioquia*, Medellín. 1995.
2. A.F.S, American Foundrymen Society. *El horno de cubilote y su operación*. Traducción. CECSA. México. 1967.
3. Mazarella, Vicente. *Informe final del proyecto: Asistencia al sub-sector de la fundición*. Fedemetal, Onudi, PNUD, Sena. Memorias del 1er Congreso Nacional de Fundición. Sena. Medellín. 1994.
4. Mejía, Héctor Daniel. "Horno de cubilote eco-eficiente en la Universidad de Antioquia". En: Carta Metalúrgica. N° 396. Bogotá. Octubre-diciembre, 1996.
5. Echeverri, Carlos. *Muestreo isocinético de material particulado en el horno de cubilote del taller de fundición del departamento de Ingeniería Metalúrgica*. Grupo de Higiene Ambiental e Industrial, U de A, Informes de Febrero y Agosto de 1996.
6. Aristizábal, Ricardo. *Modelo matemático para la temperatura del metal en horno de cubilote de soplo caliente*. Tesis de grado en Ingeniería Metalúrgica. Grupo Gipimme, Universidad de Antioquia. Medellín. Agosto de 2001.
7. Lillybeck, Norman. "Influence of Fuel Costs on Cupla Design and Operation", Modern Casting Tech. Report N° 7.515. AFS 1975.
8. Stanek, Vladimir et al. "Mathematical Model of a Cupola Furnace-Part III: Effect of Operating Conditions on Cupola Performance". AFS Transactions. Vol. 100, p. 447 (1992).
9. AFS. *Cupola Handbook*. 6th Edition. Chicago, 1999.