

Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (Parte 1)

Ever Góngora-Leyva
Amaury Palacio-Rodríguez
Diolkis Matos-Casals
José Antonio Rodríguez-Moreno

Resumen

El análisis de investigaciones relacionadas con la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios a escala industrial demostró que solo existen mediciones de temperatura del agua de enfriamiento en uno de los extremos de la piscina y no se reportan experimentos que evalúen las variables *flujo de agua* y *flujo de mineral*, ni se ha establecido su relación con la temperatura del mineral a la salida del enfriador. A partir de este precedente se instalaron seis termopares para estimar el comportamiento de la temperatura del agua de enfriamiento en tres puntos a ambos lados de la piscina, conectados al sistema de adquisición de datos de la empresa. Se estableció el diseño del experimento a partir del análisis de una población de datos de un periodo de seis meses. Los resultados demostraron que la variable de mayor incidencia en la temperatura de salida del mineral es el flujo de agua; para menores flujos de agua ($15 \text{ m}^3/\text{h}$) predomina la transferencia de calor por evaporación del agua al aire y para mayores flujos ($25 \text{ m}^3/\text{h}$) prevalece la transferencia de calor por convección; el rendimiento térmico del enfriador alcanza sus valores máximos (86 %) para los menores valores de flujo de agua ($15 \text{ m}^3/\text{h}$) y de mineral (29 t/h).

Palabras clave

Enfriadores; cilindro horizontal rotatorio; mineral laterítico; rendimiento térmico.

Assessment of the reduced ore cooling process at the Ernesto Che Guevara Plant

Abstract

The analysis of the investigations related to evaluations on the process of reduced ore cooling in rotating horizontal cylinders on an industrial scale indicated that there are only water temperature measurements on one end of pit and showed no experiments where the variables of water and ore flowrates were evaluated nor the relation with the temperature of the ore at the cooler outlet. Based on this precedent, six thermocouples were installed to calculate the cooling water temperature in three locations on both sides of the pit connected to the data input system in place in the enterprise. The design of the experiment was developed from analyzing a population of data from a 6/month period. The results showed that the variable of greater impact on the ore temperature at the cooler outlet is the water flowrate. For lower water flowrates (15m³/h) heat transfer by water evaporation to the air is predominant and for higher water flowrates (25m³/h) heat transfer by convection is predominant. Also, it was possible to know that the cooler heat output reaches the highest values (86%) with the lowest ore and water flowrates (15m³/h and 29t/h, respectively).

Keywords

Coolers; cooling; reduced ore; heat output.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido consiste en disminuir la temperatura del mismo hasta valores por debajo de 200 °C. El mineral llega a través del transportador helicoidal rotatorio al enfriador y al caer es trasladado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores y paletas, los cuales se encargan de removerlo y raspar la superficie interior del enfriador, evitando que el mineral se adhiera y dificulte el proceso de transferencia de calor con la superficie interior del cilindro. Cada sección del transportador posee un separador circular en todo el diámetro del equipo que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente.

Los enfriadores de mineral son cilindros horizontales rotatorios con extremos cónicos que enfrían el mineral después que este se ha reducido en el horno y antes de su tratamiento metalúrgico, con el propósito de preservar sus valores metálicos. Estos aparatos rotan y flotan en el agua contenida en un estanque que, además, es cambiada continuamente para mantener su temperatura a un valor razonable durante su explotación.

El mineral ingresa a través de la tapa cónica del enfriador y desciende a la porción del cuerpo cilíndrico, donde es continuamente removido y desplazado con ayuda de un sistema de paletas interiores, y va avanzando gradualmente desde la entrada hacia la salida del enfriador.

Desde los inicios de la industria del níquel en Cuba, los enfriadores de mineral han presentado dificultades durante su funcionamiento, entre las que destaca las elevadas temperaturas del mineral laterítico reducido a su descarga. La introducción de las cámaras de combustión Prior en la planta de Hornos de Reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (EECG), trajo como resultado el incremento de la productividad por horno en 5 t/h, aumentando de 34 a 44 t/h la productividad de los enfriadores y agudizando, a su vez, la dificultad de los enfriadores para disminuir la temperatura del mineral.

Las elevadas temperaturas del mineral a la salida de estos intercambiadores de calor dificultan el proceso de lixiviación, trayendo consigo la evaporación de gran cantidad de amoníaco y la baja eficiencia en la obtención de níquel metálico. Según Samalea (1997), para impedir la ebullición de la solución, el mineral reducido debe ser enfriado hasta una temperatura cercana a los 120 °C, debido a que parte del sistema de lixiviación y lavado recibe el impacto térmico no solo del calor sensible del mineral reducido sino, además, de su calor latente, el cual está dado por el llamado calor de oxidación,

proveniente de las reacciones de oxidación del hierro metálico y parte del hierro bivalente, así como de las reacciones de oxidación del níquel, cobalto, azufre y demás componentes del mineral reducido, que pasan a la solución durante la lixiviación.

Actualmente el proceso de enfriamiento en la planta de Hornos de Reducción de la EECG se caracteriza por presentar limitaciones en los métodos para la selección y cálculo de los parámetros racionales del proceso de enfriamiento, elevadas temperaturas del mineral a la salida del enfriador (mayores de 240 °C) y ausencia de mediciones, a escala industrial, de algunas variables del proceso.

Entre los autores que abordan el tema de los enfriadores de mineral laterítico reducido se destacan Valle-Matos *et al.* (2000 a y b), quienes dan una visión de los problemas existentes: la incapacidad de llevar al mineral reducido de 700 hasta 170 °C ; se operan con un porcentaje de llenado alto (20 %), incrementando el espesor de la capa de mineral y la resistencia a la transferencia de calor por conducción; a la entrada del enfriador existe una zona de perturbación de aproximadamente cinco metros donde el espesor de la capa de mineral es mayor; la conducción de calor es el mecanismo controlante y sobre el que se debe trabajar, siendo bajo el coeficiente de transferencia de calor estimado del mineral a la pared. Proponen modificaciones para aumentar la capacidad de enfriamiento de la instalación basados en cuatro corridas experimentales, las cuales se realizaron manteniendo constante el flujo de mineral y de agua y midiendo la temperatura del agua en un solo extremo de la piscina.

Investigaciones previas a escala industrial han establecido el modelo teórico para evaluar en cilindros rotatorios el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, así como las ecuaciones de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud (Góngora-Leyva *et al.* 2007, 2009). Aunque se obtuvieron resultados importantes en los experimentos a escala piloto, a escala industrial solo se limitan a observar las variables del proceso (experimentación pasiva).

Se reportan otros estudios que, aunque no investigan los enfriadores de mineral reducido, hacen aportes importantes a la transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios sumergidos en un líquido; por ejemplo, Mahfouz & Badr (1999) y Mahfouz (2003) estudian la convección (forzada y natural) en un cilindro horizontal rotatorio calentado y sumergido en un fluido y demuestran que la convección forzada es causada por la oscilación del cilindro, mientras la convección natural, por la flotación del fluido. Concluyen que el efecto

global de la oscilación es reducido por la transferencia de calor y que las condiciones de flujo dependen de los números de Rayleigh, de Prandtl, y de la proporción de flotación; además, que el proceso de transferencia de calor es gobernado por el número de Reynolds y la frecuencia dimensional de oscilaciones.

Gschwendtner (2004) establece los valores de los números de Nusselt y de Planck para diferentes condiciones de trabajo e identifica los modos de intercambio de calor predominantes. Yapici & Yalcin (2004) deducen que la velocidad de rotación tiene un efecto significativo en las características hidrodinámicas y la distribución de los coeficientes de transferencia de calor locales en un cilindro horizontal rotatorio. Panday (2005) presenta los resultados experimentales al deslizarse una película de agua por sobre la superficie de un cilindro horizontal. Demuestra que la transferencia de calor local aumenta al aumentar el flujo de agua y la velocidad de flujo de aire, pero la densidad del flujo de calor local disminuye al aumentar la temperatura del agua de alimentación a la entrada.

Góngora-Leyva y Valle-Matos evalúan experimentalmente un enfriador de mineral laterítico reducido a partir del comportamiento de las variables temperatura de la pared exterior del cilindro, temperatura del agua y temperatura del mineral, para un flujo de agua y de mineral constante, por lo que se desconoce el efecto de estos dos últimos en la temperatura de salida del mineral laterítico reducido. Considerando los resultados precedentes, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de las variables flujo de mineral y flujo de agua sobre la temperatura de salida del mineral reducido en el enfriador de la planta de Hornos de Reducción de la EECG.

1.1. Características del proceso de enfriamiento del mineral reducido

Desde el punto de vista termodinámico, en este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor. El mineral descargado en el interior del cilindro a 750 °C transfiere calor a la superficie interior del cilindro por conducción producto del contacto sólido-sólido (mineral-enfriador), siendo este el modo predominante; también transfiere calor por convección, debido a la presencia de gases productos de la combustión que acompañan el mineral hasta el interior del cilindro; y por radiación, por la alta temperatura del mineral en el interior del enfriador. A través del espesor de la pared ($\delta = 16$ mm) del cilindro de acero (AISI 1340) que separa el mineral del agua, el flujo de calor se transfiere por conducción; debe tenerse en cuenta que este proceso ocurre con mayor intensidad en la zona en que el mineral está en contacto con la pared interior del cilindro.

Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador este intercambia calor con el agua de la piscina que entra a 29 °C, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores promedios de 82 °C; este proceso de intercambio de calor ocurre por convección.

La Figura 1 muestra la sección transversal de la instalación objeto de estudio la cual está formada por el mineral laterítico reducido (1), el cilindro horizontal rotatorio (2), la piscina de agua para el enfriamiento (3) y el aire alrededor de la instalación. Se representan los modos de transferencia de calor predominantes en cada región.

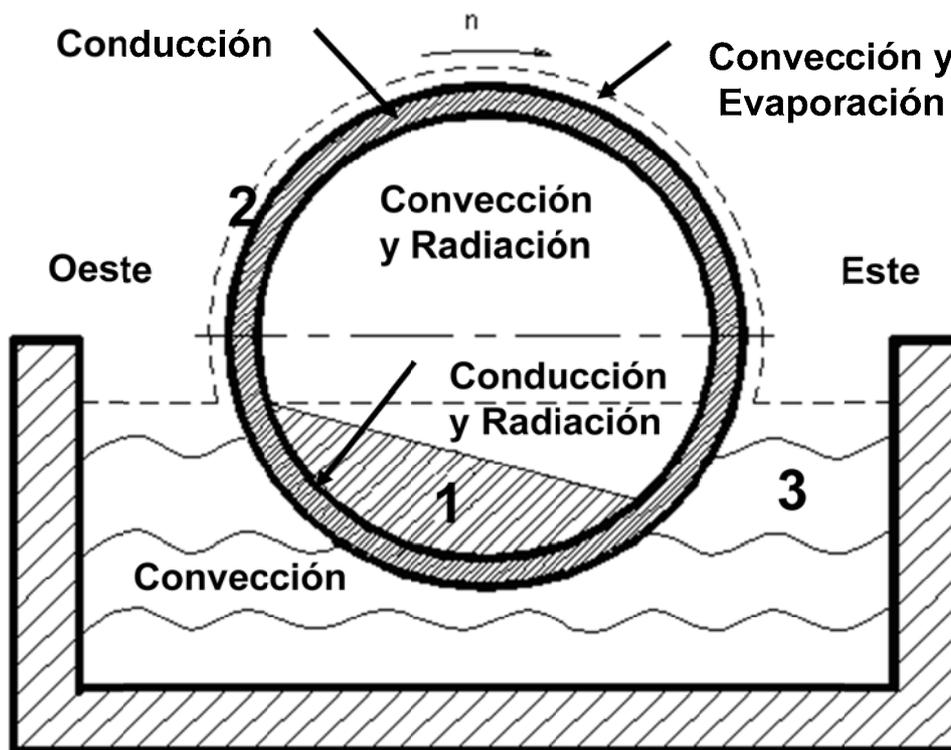


Figura 1. Representación gráfica del proceso de transferencia de calor en el enfriador cilíndrico de mineral (corte transversal).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instalación experimental

Para la realización de los experimentos se seleccionó el enfriador de la Línea 5, de la planta de Hornos de Reducción de la EECG; el mismo consta de los siguientes equipos y accesorios: enfriador cilíndrico rotatorio, motores eléctricos y piscina de agua de enfriamiento.

El sistema de adquisición de datos de la empresa permite controlar los parámetros del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido (flujo de mineral, temperatura en el hogar 15 del horno de reducción, temperatura del mineral a la salida del enfriador, flujo de agua, temperatura del agua en la piscina y corriente consumida por los motores eléctricos). Para realizar los experimentos, adicionalmente se midió la temperatura del agua en seis puntos de la piscina, según se muestra en la Figura 2.

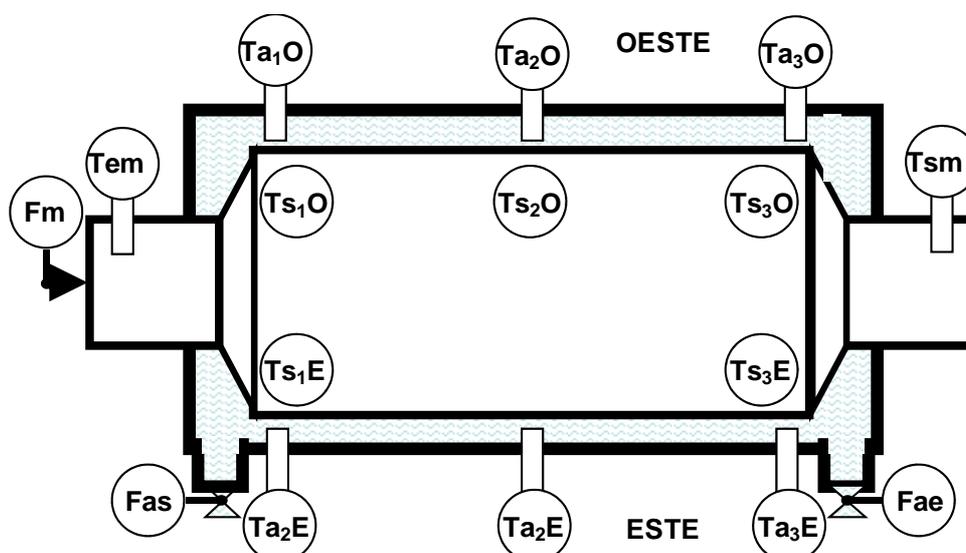


Figura 2. Vista superior de la posición de los instrumentos de medición en el enfriador.

Donde:

- F_m ; Flujo de mineral
- F_{ae} , F_{as} ; Flujo de agua a la entrada y a la salida de la piscina
- Tem ; Temperatura del mineral a la entrada del enfriador
- Tsm ; Temperatura del mineral a la salida del enfriador
- Ta_1E , Ta_2E , Ta_3E ; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos, lado este
- Ta_1O , Ta_2O , Ta_3O ; Temperatura del agua de la piscina en tres puntos, lado oeste
- Ts_1E , Ts_2E , Ts_3E ; Temperatura de la superficie del cilindro en tres puntos, lado este
- Ts_1O , Ts_2O , Ts_3O ; Temperatura de la superficie del cilindro en tres puntos, lado oeste

Tabla 1. Resumen de los parámetros registrados e instrumentos de medición

Parámetro	Equipo
Flujo de mineral alimentado al enfriador	Báscula de pesaje continuo, tipo WESTERDAM
Temperatura del mineral	Termopar tipo K
Temperatura del agua en la piscina	Termómetro de resistencia PT-100
Flujo de agua que entra a la piscina	Elemento primario de caudal tipo PITOT delta
Velocidad de rotación del enfriador	Tacogenerador
Temperatura de la superficie del cilindro	Pirómetro Digital, de mano. Modelo RAYMXPE

2.1. Procedimiento para evaluar el proceso de enfriamiento del mineral

Aplicando la ley de conservación de la masa y la energía se evalúa la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema. En el caso estudiado se pone de manifiesto la transferencia de masa del agua al aire, a través del enfriamiento por evaporación, que ocurre siempre que un flujo de gas fluye sobre un líquido. La evaporación debe ocurrir a partir de la superficie del líquido y la energía asociada con el cambio de fase es el calor latente de vaporización del líquido. La evaporación ocurre cuando las moléculas de agua cerca de la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía por encima de la necesaria para vencer la energía de unión de la superficie. La energía que se requiere para mantener la evaporación debe venir de la energía interna del líquido, que entonces experimenta una reducción en la temperatura (efecto de enfriamiento). Sin embargo, si se mantienen las condiciones estacionarias, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe recuperarse mediante la transferencia de energía al líquido desde sus alrededores (Incropera & DeWitt 1999).

La ecuación (1) describe el balance térmico del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.

$$Q_{H_2O} = Q_m - Q_{ma} \quad (1)$$

donde:

Q_{H_2O} - Calor absorbido por el agua; kW

Q_m - Calor cedido por el mineral; kW

Q_{ma} - Pérdida de calor al medioambiente; kW

El calor transferido del mineral al agua se determina por la ecuación (2) y depende de las propiedades y las temperaturas de entrada y salida del agua del sistema.

$$Q_{H_2O} = \dot{m}_{sH_2O} \cdot C_{psH_2O} \cdot T_{sH_2O} - \dot{m}_{eH_2O} \cdot C_{peH_2O} \cdot T_{eH_2O} \quad (2)$$

donde:

\dot{m}_{eH_2O} , \dot{m}_{sH_2O} - Flujo másico del agua a la entrada y a la salida; kg/s

C_{peH_2O} , C_{psH_2O} - Calor específico del agua a la entrada y a la salida; J/kg·K

T_{eH_2O} - Temperatura del agua a la entrada de la piscina; K

T_{sH_2O} - Temperatura del agua a la salida de la piscina; K

Para determinar el calor entregado por el mineral se utiliza la ecuación (3), y se considera que todo el mineral que entra al enfriador es igual al que sale.

$$Q_m = \dot{m}_m \cdot C_{pm} \cdot (T_{em} - T_{sm}) \quad (3)$$

donde:

$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ - Flujo de mineral; kg/s

T_{em} - Temperatura del mineral a la entrada; K

T_{sm} - Temperatura del mineral a la salida; K

C_{pm} - Calor específico del mineral; J/kg·K

Las ecuaciones (1, 2, y 3) dependen de las propiedades del mineral y del agua de enfriamiento, pero para determinar la cantidad de calor transferida al medio ambiente es necesario tener en cuenta la transferencia de calor por convección.

Para determinar la cantidad de calor que se disipa al medio ambiente se utiliza la ecuación (4) que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire. Se considera, además, que en todo momento el cilindro parcialmente sumergido en la piscina permanece cubierto por una pequeña película de agua, es decir, la superficie metálica del cilindro no hace contacto con el aire circundante. La transferencia de calor de la pared al medio circundante solo es posible a través del agua.

$$Q_{ma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (T_{agua} - T_{aire}) \quad (4)$$

donde:

α_{agua} - Coeficiente de transferencia de calor por convección; W/m²·K

A_{agua} - Área ocupada por el agua; m²

T_{agua} - Temperatura del agua en la piscina; K

T_{aire} - Temperatura del aire; K

El coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio ambiente se determina a través de la ecuación (5) (Incropera & DeWitt 2003), que tiene en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua, la cual depende de números adimensionales, como el número de Reynolds; el número de Schmidt; y el número de Sherwood, que proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie al aire.

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot 0,0296 \cdot \left(\frac{v_{aire} \cdot D_e}{v_{aire}} \right)^{\frac{4}{5}} \cdot \left(\frac{v_{aire}}{D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot D_{AB} \cdot (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{L \cdot (\theta_{agua} - \theta_{aire})} \quad (5)$$

Donde:

h_{fgv} - Calor latente de vaporización; kJ/kg

$\rho_{A,sat}$ - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie; kg/m³

$\rho_{A,\infty}$ - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura del aire; kg/m³

V_{aire} - Velocidad del aire; m/s

ν_{aire} - Viscosidad cinemática del aire; m²/s

D_{AB} - Coeficiente de difusión de masa; m²/s

L - Longitud del enfriador; m

D_e - Diámetro exterior del cilindro; m

La eficiencia del enfriador se determina a través de la ecuación (6) (Kern 1999).

$$\eta_e = \frac{(T_{em} - T_{sm})}{(T_{em} - T_{agua})} \quad (6)$$

donde:

η_e - Eficiencia del enfriador

2.2. Selección de las variables

Para establecer el rango de variación de las variables que garantice la realización de los experimentos sin afectar el proceso productivo fue necesaria la evaluación de una base de datos (población) a través del análisis estadístico descriptivo que permitió determinar los valores medios de las principales variables que describen el proceso, según muestra la Tabla 2; la temperatura de entrada del mineral se considera una perturbación debido a que no existe en el proceso industrial método alguno para su variación.

Tabla 2. Análisis estadístico descriptivo de la muestra para los meses de diciembre de 2010 a mayo de 2011

Estadísticos	Flujo		Temperatura (°C)			
	mineral (t/h)	agua (m ³ /h)	agua	Salida de mineral	Entrada de mineral	
					Horno 1	Horno 2
Media	33,96	14,48	84,50	191,10	761,82	633,67
Error típico	0,06	0,08	0,05	0,49	0,29	1,29
Mediana	34,00	13,27	84,59	189,20	761,49	636,94
Moda	34,00	16,39	76,95	252,15	766,98	595,19
Desviación estándar	4,02	3,03	3,51	31,75	18,47	83,27
Varianza de la muestra	16,13	9,17	12,35	1008,22	347,21	6933,6 2
Curtosis	4,06	10,51	1,04	0,14	16,42	11,44
Coefficiente de asimetría	-1,49	2,97	-0,50	0,03	-0,41	-2,47
Rango	28,00	23,55	33,44	218,39	401,50	729,85
Mínimo	15,00	10,58	60,45	101,10	502,14	128,83
Máximo	43,00	34,14	93,89	319,48	903,63	858,68
Cuenta	4162	4162	4162	4162	4162	4162
Nivel de confianza (95,0%)	0,12	0,17	0,11	0,96	0,56	2,53

2.3. Flujo de mineral

Los valores mínimos del flujo de mineral se deben a las operaciones que se realizan durante la puesta en marcha del horno. Esto se justifica debido a que solo se alcanzan valores por debajo de la media (33,96 t/h) en casos de averías o arrancadas después del mantenimiento. La capacidad máxima de un horno es 22 t/h, para una productividad por enfriador de 44 t/h, siendo el valor máximo alcanzado en el periodo evaluado de 43 t/h, lo que justifica que los hornos trabajen siempre a su capacidad nominal. El flujo de mineral se identifica como variable de entrada al sistema debido a que puede manipularse y ver su efecto en la temperatura del mineral a la salida del enfriador.

2.4. Temperatura del agua en la piscina

La temperatura del agua en la piscina es un reflejo de la eficiencia del proceso de transferencia de calor ya que depende del calor entregado por el mineral y del flujo de agua que se suministre a la piscina de

enfriamiento. La Tabla 2 muestra que los valores de la temperatura del agua en la piscina oscilan fuera del valor establecido, que según el Manual de Operaciones de la planta de Hornos de Reducción (1985), debe ser de 70 °C. La causa de esto es, principalmente, la operación manual del proceso que provoca dispersión en la temperatura del agua en la piscina. La misma se puede mantener constante a través de la manipulación del flujo de agua que entra a la piscina, relación que se explica a través de la ecuación (2) y es por ello que no se selecciona como una variable de entrada al sistema.

2.5. Flujo de agua que entra a la piscina

El flujo de agua es manipulado con el objetivo de garantizar una temperatura alrededor de los 70 °C en la piscina y la flotación del cilindro, y contribuir al menor consumo de energía eléctrica. Los valores del flujo de agua oscilan entre 10 y 34 m³/h, pero según el Manual de Operaciones de la planta de Hornos (1985), este flujo debe estar entre los 80 y 100 m³/h. Este parámetro también se identifica como una variable de entrada al sistema debido a que la misma se puede manipular para ver su efecto en la temperatura de salida del mineral del enfriador.

2.6. Temperatura del mineral a la salida del enfriador

El valor medio de la temperatura del mineral a la descarga del enfriador es de 191,10 °C y siendo el valor de la moda igual a 252,15 °C muestra un comportamiento acorde a la realidad del proceso, según su régimen de explotación actual y, al igual que para el flujo de mineral, los valores mínimos corresponden a situaciones de arrancadas, paradas o averías del proceso en los hornos o en los enfriadores cilíndricos horizontales. Este parámetro se identifica como variable de salida o dependiente, debido a que es la que caracteriza la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral.

2.7. Técnica experimental

Estudios preliminares permitieron establecer el rango de operación de las variables que garanticen la realización de los experimentos, sin afectar el proceso productivo. Para la realización de esta investigación se fijaron los valores de flujo de mineral y de agua que se muestran en la Tabla 3 y 4 garantizando así una de las principales exigencias de la dirección de la planta.

La metodología utilizada durante la realización de los experimentos es la siguiente:

1. Se calibraron los instrumentos que se describen en la Tabla 1 y que se utilizan para medir los valores de las variables que intervienen en el proceso.
2. Se comprobó la conexión de los instrumentos empleados al sistema de adquisición de datos de la empresa para el registro y monitoreo de las variables.
3. Se procedió a establecer un flujo de mineral constante, teniendo en cuenta que el tiempo de retención del mineral en el horno es de 35 a 40 minutos (Valle, 2000a). Se registró la hora y la fecha del momento en que se garantizó la estabilidad del sistema para las nuevas condiciones.
4. Se procedió a establecer el flujo de agua, registrando la hora y la fecha; se esperó mientras se observaba en el sistema de adquisición de datos de la empresa hasta que la temperatura del mineral a la descarga se mantuviera estable.
5. Se procedió a realizar mediciones de la temperatura de la pared exterior del cilindro en ambos lados (este y oeste) de la instalación.
6. Cada una de las pruebas se repitió tres veces, y un resumen de los resultados se observan en las Tablas 3 y 4 luego de la previa limpieza de datos en los casos necesarios.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos iniciales, las mediciones realizadas y utilizando el procedimiento de cálculo establecido, se procede a la evaluación térmica del enfriador. Para el análisis del caso de estudio se asume que la temperatura del mineral a la entrada del enfriador es igual a la temperatura del mineral a la salida del horno 1, debido a que la misma es considerada una perturbación; además, por las características propias del proceso se hace difícil la instalación de un termopar a la entrada del enfriador, por estar todos estos mecanismos en movimiento de rotación y en presencia de agua.

3.1. Comportamiento de los parámetros que caracterizan el proceso

En la Tabla 3a se observa que el agua alcanza el valor más elevado de temperatura a mayor flujo de mineral y en el lado oeste de la piscina; además, se comprobó que experimenta una variación promedio de 15 °C,

siendo mayor en el lado este y para menores flujos de mineral. Este comportamiento se debe a que el mineral transfiere mayor cantidad de calor hacia el lado oeste, ya que el mismo se inclina en esa dirección a causa de la rotación del cilindro, además, el agua de enfriamiento se suministra por el lado este y presenta dificultades para garantizar la reposición del agua caliente en la otra zona debido a las características constructivas de la instalación. Se debe destacar que para los tres flujos de agua utilizados en los experimentos se obtuvieron comportamientos similares, con una ligera disminución de la temperatura en los puntos dos y tres, no así en el punto uno, que es por donde se suministra el mineral caliente al enfriador.

Tabla 3a. Resultados experimentales

Flujo		Temperatura a la salida			Temperatura del agua (°C)					
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	Enfriador (°C)	Horno (°C)		Lado Este			Lado Oeste		
			1	2	1	2	3	1	2	3
			29,40	15,00	156,83	784,12	650,00	80,78	72,13	64,66
29,40	20,00	158,68	784,16	647,35	78,85	67,86	61,03	79,71	72,74	62,57
29,40	25,00	200,33	779,66	625,64	79,31	69,62	62,41	80,27	73,99	63,88
32,40	15,00	205,58	766,67	642,88	78,64	69,45	63,39	79,65	72,37	65,53
32,40	20,00	239,69	763,94	634,91	77,51	66,29	61,86	78,46	70,01	63,89
32,40	25,00	253,17	756,10	614,93	78,11	67,79	63,60	79,07	72,07	65,82
35,40	15,00	240,08	766,39	582,36	78,52	72,26	65,69	79,38	75,44	67,22
35,40	20,00	258,00	765,25	583,13	81,62	75,05	68,84	81,94	77,86	70,82
35,40	25,00	247,05	764,97	581,08	81,58	71,58	66,62	82,44	75,86	68,63

En la Tabla 3b se observa que para mayor flujo de mineral la temperatura de la pared del cilindro es mayor, siendo más caliente la superficie orientada al oeste, coincidiendo con el comportamiento de la temperatura del agua. Además, se comprobó que en los primeros 15 m la pared del cilindro experimenta disminución de la temperatura en 14 °C como promedio y en la otra mitad de solo 4 °C. Este comportamiento demuestra que la mayor cantidad de calor es entregada al agua en la primera mitad del cilindro.

Tabla 3b. Resumen de los resultados experimentales

Flujo		Temperatura de la pared (°C)					
		Lado Este			Lado Oeste		
Mineral (t/h)	Agua (m ³ /h)	1	2	3	1	2	3
29,40	15,00	96,27	81,83	70,10	93,60	78,97	73,47
29,40	20,00	95,07	84,42	64,70	94,45	77,30	69,62
29,40	25,00	91,88	83,97	73,12	86,05	80,53	69,55
32,40	15,00	98,23	71,05	71,88	89,77	73,62	72,02
32,40	20,00	91,95	71,25	69,43	94,57	74,47	72,25
32,40	25,00	93,52	70,83	70,53	93,43	72,48	72,65
35,40	15,00	91,90	86,18	88,27	94,43	89,57	85,30
35,40	20,00	94,30	86,62	76,57	96,80	84,33	81,50
35,40	25,00	90,30	79,64	82,56	96,22	80,70	76,08

La Figura 3 muestra la relación entre la cantidad de calor que se cede al medio ambiente y el calor absorbido por el agua en la piscina para diferentes flujos de mineral y de agua. Se comprobó que para altos flujos de mineral y pequeños flujos de agua la mayor cantidad de calor transferida al medio ambiente es por evaporación, pero cuando se opera con flujos de agua superiores a los 20 m³/h, entonces predomina la transferencia de calor por convección del cilindro al agua y del agua al aire, siendo la sumatoria de ambas cantidades de calor el total transferido al medioambiente, valor que tiende a mantenerse constante. Se comprobó también, según muestra la Figura 4, que para menores flujos de agua la cantidad de agua que se evapora es mayor.

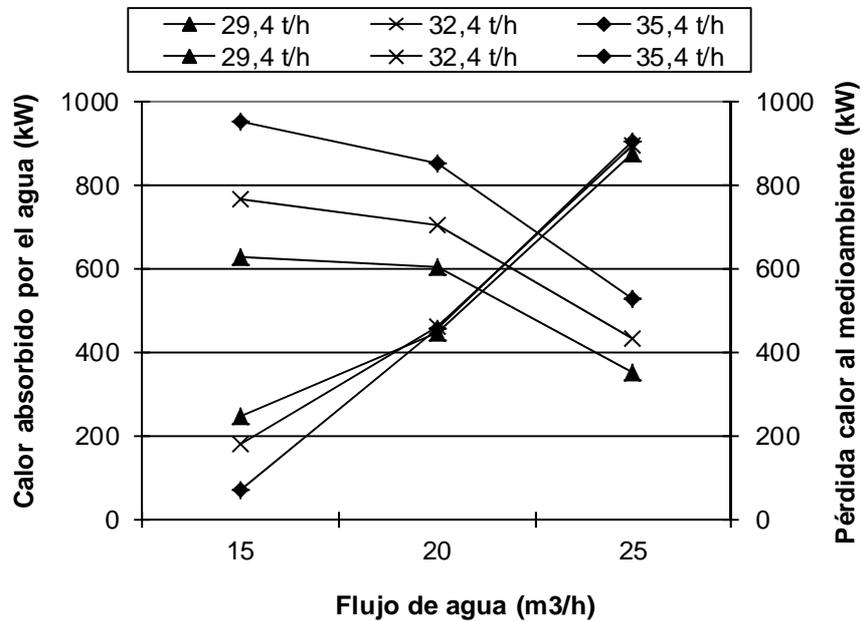


Figura 3. Comportamiento del calor cedido al medio ambiente y absorbido por el agua con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

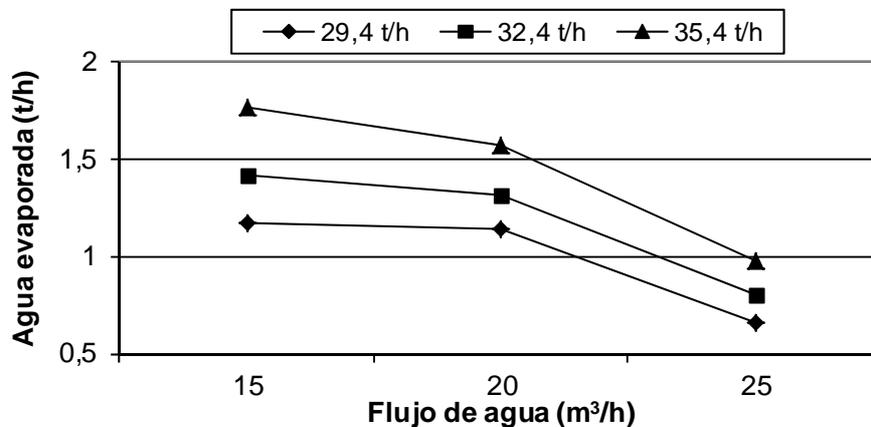


Figura 4. Comportamiento de la cantidad de agua evaporada con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

Al aumentar el flujo de mineral, manteniendo constante su temperatura de entrada y el área de transferencia de calor, se incrementa la temperatura del mineral a la descarga del enfriador, según muestra la Figura 5, relación avalada por la ecuación (3). También se observa que para mayores flujos de agua la temperatura del mineral a la descarga es mayor, comportamiento originado por la deficiente distribución del agua, que se suministra a contracorriente por el lado este, donde se encuentra la tubería de evacuación.

Además, la piscina cuenta con estructuras de hormigón en su interior que dificultan el movimiento del agua.

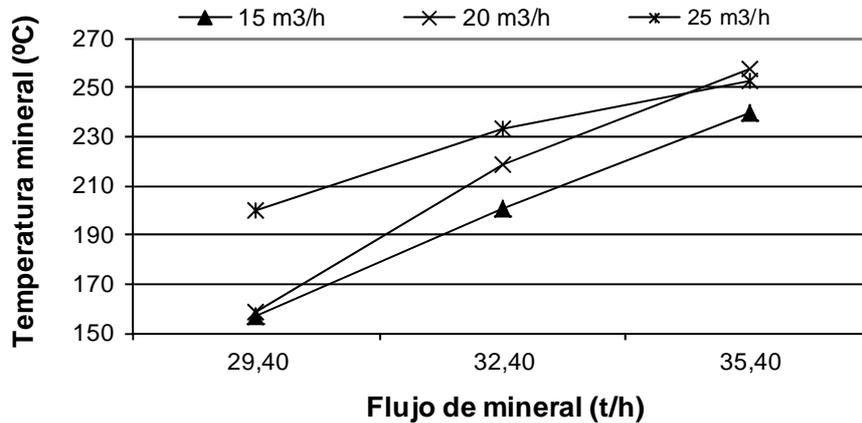


Figura 5. Comportamiento de la temperatura del mineral con respecto al flujo de mineral para diferentes flujos de agua.

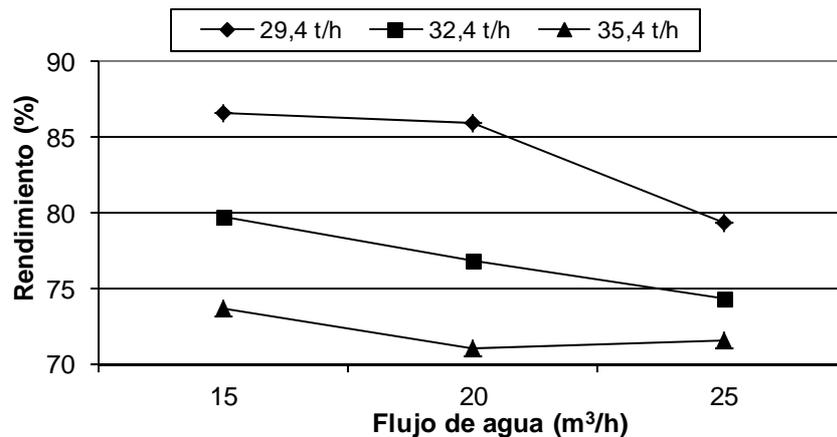


Figura 6. Comportamiento del rendimiento del enfriador con respecto al flujo de agua para diferentes flujos de mineral.

Según se muestra en la Figura 6 el enfriador trabaja más eficientemente a menores flujos de mineral y de agua. Se considera que dicho comportamiento es debido a que para un flujo de mineral mayor de 29,4 t/h el flujo de agua que se necesita para el enfriamiento debe ser mayor que los utilizados en los experimentos aquí realizados.

4. CONCLUSIONES

- Para flujos de mineral de 35,4 t/h y flujos de agua de 15 m³/h el modo de transferencia de calor predominante es la convección por evaporación y la cantidad de agua evaporada oscila entre 0,66 y 1,77 t/h.
- Para flujos de agua de 20 y 25 m³/h la diferencia entre la cantidad de calor absorbida es mínima para flujos de mineral de 29,4; 32,4 y 35,4 t/h.
- Se comprobó que el rendimiento de la instalación objeto de estudio oscila entre 71 y 86 %, alcanzándose los mejores resultados para un flujo de mineral de 29,4 t/h y un flujo de agua entre 15 y 20 m³/h.

5. REFERENCIAS

- GÓNGORA-LEYVA, E.; GUZMÁN-DEL RÍO, D.; COLUMBIÉ-NAVARRO, A. O.; MARRERO-RAMÍREZ, S. & RETIRADO-MEDIACEJA, Y. 2007. Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales. *Revista Energética* 28(2): 15-25.
- GÓNGORA-LEYVA, E.; LAMORÚ-URGELLÉS, M.; COLUMBIÉ-NAVARRO, A. O.; RETIRADO-MEDIACEJA, Y.; LEGRÁ-LEGRÁ, A. & SPENCER-RODRÍGUEZ, Y. 2009. Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. *Minería y Geología* 25(3): 1-18.
- GSCHWENDTNER, M. A. 2004. Optical investigation of the heat transfer from a rotating cylinder in a cross flow. *Heat and Mass Transfer* 40: 561-572.
- INCROPERA, F. P. & DEWITT, D. P. 1999. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4 ed. Prentice Hall, México, 912 p.
- KERN, D. Q. 1999: *Procesos de transferencia de calor*. 13 ed. Continental, S. A. de C. V., México, 980 p.
- Manual de Operaciones de la planta de Hornos de Reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
- MAHFOUZ, F. M. & BADR, H. M. 1999. Heat convection from a cylinder performing steady rotation or rotary oscillation. *Heat and Mass Transfer* (34): 375-380.
- MAHFOUZ, F. M. 2003. Transient free convection from a horizontal cylinder placed in a micropolar fluid. *Heat and Mass Transfer* (39): 455-462.
- PANDAY, P. K. 2005. Experimental analysis of the local heat transfer coefficient of falling film evaporation with and without co-current air flow velocity. *Heat Mass Transfer* (41): 1066-1076.
- SAMALEA, M. G. J. 2000. Métodos de lixiviación de lateritas que contienen níquel y cobalto. Universidad de La Habana. No de publicación: CU 22620 A1; No. de solicitud: 1997/052; Int. CI: C22B 3/00, B03B 5/00.
- VALLE-MATOS, M.; GARCÍA-PÉREZ, M.; RABELL-GONZÁLEZ, D. & MORALES-MORALES, Y. 2000a. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa (1). *Tecnología Química* 18(1): 70-77.

- VALLE-MATOS, M.; GARCÍA-PÉREZ, M.; RABELL-GONZÁLEZ, D. & MORALES-MORALES, Y. 2000b. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa (2). *Tecnología Química* 20(2): 10-15.
- YAPICI, H. & YALCIN, S. 2004. Transient temperature and thermally induced stress distributions in a partly-circumferentially heated cylindrical workpiece. *Heat Mass Transfer* (41): 104–111.

Ever Góngora-Leyva

Profesor Auxiliar, Máster en Electromecánica Minero-Metalúrgica.
Centro de Estudios de Energía y Tecnologías de Avanzada de
Moa, Cuba.

egongora@ismm.edu.cu

Amaury Palacio-Rodríguez

Profesor Titular. Doctor en Ciencias Técnicas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

apalacios@ismm.edu.cu

Diolkis Matos-Casals

Ingeniero Mecánico. Máster en Ciencias
Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa, Cuba.

dmcasals@ecg.moa.minbas.cu

José Antonio Rodríguez-Moreno

Ingeniero Metalúrgico
Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa, Cuba

jrmoreno@ecg.moa.minbas.cu