

# ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE SECADO DE MINERAL LATERITICO EN LOS HORNOS CILINDRICOS

Carlos Zalazar Oliva<sup>1</sup>

Ever Góngora Leyva<sup>2</sup>

Sadis Leyva Legrá<sup>2</sup>

Dries Haeseldonckx<sup>3</sup>

Jo Van Caneghem<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, ISMM, Moa, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, ISMM, Moa, Cuba.

<sup>3</sup> KU Leuven, Departamento de ingeniería, Bélgica

Correo de contacto \* : [czalazar@ismm.edu.cu](mailto:czalazar@ismm.edu.cu)

## Resumen:

El secado es el proceso mediante el cual se realiza la extracción de toda o parte de la humedad contenida de una sustancia, obteniéndose un producto diferente al inicial, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación. En el presente trabajo se realiza el estudio de los procesos de transferencia de calor que intervienen en el secado de mineral laterítico en hornos cilíndricos horizontal rotatorio, además se analiza el funcionamiento de un modelo matemático en la predicción del comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de secado como: la temperatura del gas, el mineral y la variación de la humedad del mineral. El mismo consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales obtenidas a partir del balance de masa y energía al mineral, el gas y la pared del secador. Para la solución del modelos se empleó el método numérico Runger Kutta 4to orden. Con este modelo, una vez ajustado, permitirá ajustar el funcionamiento del horno con el fin de optimizar tanto el uso de la energía como la calidad del producto.

**Palabras claves:** *Transferencia de calor; Modelo matemático, secador, horizontal rotatorio, mineral laterítico*

## Introducción

El 12 % del consumo mundial de la energía a nivel industrial es destinado al secado de sólidos, por tales motivos numerosos investigadores se han dedicado al estudio de estos

procesos y de las instalaciones en donde se realizan. Los objetivos principales de estas investigaciones son: evaluar las influencias de las principales variables de entrada sobre las variables de salida; determinar los parámetros óptimos de funcionamiento y disminuir el consumo de los portadores energéticos. Para cumplir estos objetivos, generalmente, se proponen modelos matemáticos que expresan relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables.

La literatura especializada recoge una gran diversidad de modelos matemáticos para el proceso de secado, los más empleados son, i) aquellos que están basados en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado (Modelos heurísticos) [1-3]; ii) los que utilizan las observaciones directas del proceso o los resultados de obtenidos a partir de la experimentación (Modelos empíricos); y lo que permiten determinar el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción o cualquier otra situación (Modelos de optimización)[4].

La gran diversidad de modelos para el secado se debe a los numerosos materiales que se secan en equipos comerciales y a los muchos tipos de equipos que se utilizan, por lo que, no existe una sola teoría de secado que comprenda todos los materiales y tipos de secadores. Las variaciones posibles en forma y tamaño de los materiales, de los equilibrios de humedad, de los mecanismos del flujo de humedad a través del sólido, así como en el método de transferencia de calor que se requiere para la vaporización, impiden que exista un tratamiento unificado de estos modelos [5] por lo que es preciso la particularización de los modelos para el secado de cada sólido y las instalaciones en donde se realiza.

Por lo anteriormente planteado en la presente investigación se propone un modelo matemático para el secado de mineral laterítico en un secador cilíndrico horizontal rotatorio, ubicado en una empresa especializada para la producción de Níquel + Cobalto con el objetivo de determinar el gradiente de temperatura del gas, el mineral y la variación de la humedad en toda la longitud del secador. En la misma, según informes económicos de la entidad, en este proceso se consume alrededor de 30 % de toda la energía consumida para la producción del Níquel + Cobalto, por lo que es prioridad de la entidad comprender el proceso para darle un uso más eficiente.

La empresa donde se encuentra ubicado el objeto de estudio está basada en la tecnología de Carbonato Amoniacal. Esta tecnología se distingue por el uso de equipos como hornos de soleras múltiples, espesadores y columnas de destilación [6].

En este esquema, el mineral se obtiene a partir de varios procesos, los cuales comienzan con la extracción de las menas lateríticas en las minas a cielo abierto y son incorporadas al flujo tecnológico a través de la Planta de Preparación de Mineral (en donde se encuentran el objeto de estudio); a partir de esta el material circula por diferentes unidades básicas de producción, (Planta de Hornos de Reducción; Lixiviación y Lavado; Precipitación de Sulfuro de Níquel más Cobalto y de Recuperación) hasta llegar a la Planta de Calcinación y Sínter, donde culmina el proceso con la obtención del óxido de níquel sinterizado, el óxido de níquel en polvo y el sulfuro de níquel y cobalto.

### Descripción de la instalación

El secador de mineral laterítico estudiado, para el secado emplea la energía calórica suministrada por los gases generados en la cámara de combustión (1), y los gases residuales del proceso de reducción de mineral en los hornos de soleras, esta mezcla de gases son enviados a la cámara de paso (2) en donde son mezclados con más aire de exceso para aumentar el volumen de gases.

El tambor o cilíndrico rotatorio (3), en donde se realiza el proceso de secado, tiene 5,4 m de diámetro y 40 m de longitud, posee un ángulo de inclinación 15 grados sexagesimales, respecto al plano horizontal, para facilitar el mezclado y traslado del material. El mismo trabaja en isocorriente (Figura 1).

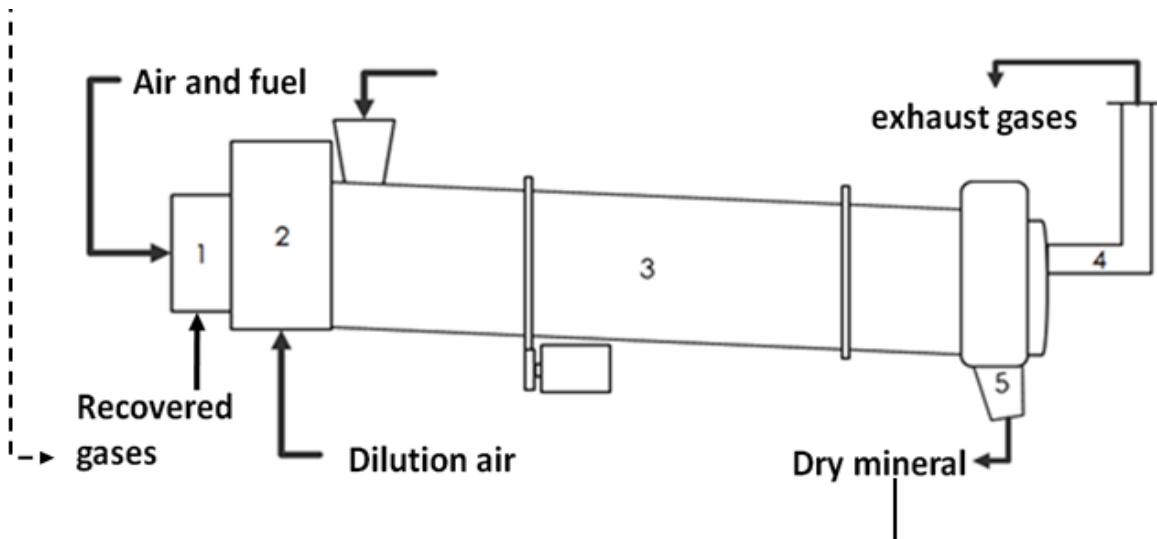


Figura 1. Esquema del secador de mineral

Además, en la parte interna del cilindro están dispuestas una serie de palas o aletas soldadas que favorecen la elevación y volteo del material mientras el cilindro rota (6 rpm) apoyado sobre rodillos, permitiendo un mejor contacto entre el sólido y la corriente gaseosa.

Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan temperaturas de aproximadamente 1500 °C y descienden a 800-850 °C al ponerse en contacto con el aire de dilución. A esta temperatura es con la que entran los gases al tambor secador de forma que, este contacto gases calientes – mineral permite que este último se seque y se obtenga al final un producto con humedad de  $\pm 3\%$ .

### Procesos de transferencia de calor y masa

En un secador cilíndrico rotatorio, el calor se transfiere al sólidos por dos trayectorias, a través de la superficie superior expuesta y la superficie que está en contacto con la pared cubierta por inferior [7]. Los mecanismos de flujo de calor en el proceso de secado se pueden describir a partir de la figura 2. En la superficie superior, el sólido reciben calor directamente por radiación y convección de la mezcla de gases suministrados al proceso ( $Q_1$ ) y el calor cedido por la pared no cubierta por convección y radiación ( $Q_2$ ), mientras que en la superficie inferior que se encuentra en contacto con la pared cubierta el calor transmite por una combinación de radiación y conducción ( $Q_3$ ). Esta última trayectoria de transferencia de calor es parte del ciclo regenerativo de la pared del horno, que a medida que gira, recibe también energía térmica a través de la radiación y la convección; por supuesto, una parte de este calor se pierde al exterior mediante la conducción de calor de la pared interior a la exterior ( $Q_4$ ).

El otro proceso transferencia que intervienen en el secado de sólido, están asociado a la transferencia de masa producida por la evaporación del agua contenida en el sólido que son evacuadas en los gases. A demás, se pudiera considera las partículas pequeñas en forma de polvos que se generan en el secado del sólido que son arrastrados junto con los gases de escape del proceso.

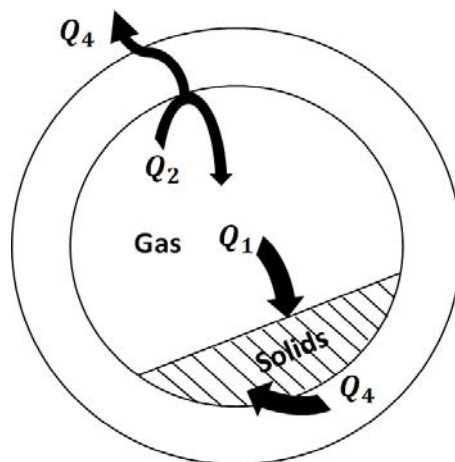


Figura 2 . Modos de transferencia de calor en el interior den secador

### **Método de modelación matemática**

Para el modelado del proceso de secado de mineral laterítico, se plantea un sistema de ecuaciones diferenciales obtenidas a partir del balance de energía y masa realizado al sólido, el gas y a la pared del secador, Para el planteamiento del modelo se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- Los cambios de velocidades para el sólido y el gas, así como las partículas de sólido arrastradas por el gas son despreciables.
- Todas las variables son uniformes en la dirección radial.

Según los procesos de transferencia de calor que pueden intervenir en el secado de sólidos dentro de un cilindro rotatorio, a continuación, se proponen las ecuaciones para determinar el calor masa del gas, sólido y la pared obtenidas mediante el balance de energía y masa.

### **Balance de energía del gas**

En el caso estudiado , para determinar el calor del gas se propone la ecuación 1, en la cual se tienen presente: el calor transferido del gas a través de la convección ( $Q_{con(g_s)}$ ,  $Q_{con(g_w)}$ ) y radiación ( $Q_{Rad(g_s)}$ ,  $Q_{Rad(g_w)}$ ) al sólido y a la pared, más el calor requerido para calentar el vapor de agua por encima de la temperatura de ebullición del agua ( $Q_h$ ) [8].

$$Q_g = -Q_{Con(g_s)} - Q_{Rad(g_s)} - Q_{Con(g-w)} - Q_{Rad(g-w)} + Q_h \quad (1)$$

### **Balance de energía para el sólido**

Como anteriormente se expuso el calor del sólido depende del calor cedido del gas mediante la convección y radiación; más el calor transferido por la conducción y radiación de la pared al sólido; además se tiene en cuenta el calor que se pierde producto a la vaporización del agua, por tanto, la ecuación que se propone para el sólido es la siguiente (ecuación 2).

$$Q_s = Q_{Con(g_s)} + Q_{Rad(g_s)} + Q_{Cond(w_s)} + Q_{Rad(w_s)} - Q_i \quad (2)$$

### **Balance de energía para la pared**

Para determinar la temperatura de la pared se tienen presentes el flujo de calor neto transferido hacia la pared exterior (ecuación 3) [7].

$$Q_{sh} = Q_{(g_eW)} + Q_{(es_eW)} + Q_{(s_cW)} \quad (3)$$

### **Balance de masa**

Para determinar la variación de la humedad en el sólido se tienen en cuenta las dos fases de secado de una sustancia. La primera, está gobernada por la evaporación y se considera que la superficie sólida permanece saturada. En la segunda, el proceso de secado se gobierna por la difusión de humedad desde adentro de la partícula hacia su superficie [5, 9].

Cuando el agua se evapora desde la superficie hacia el medio y si se presenta en estado de equilibrio, entonces la velocidad de transferencia de calor es igual a la transferencia de masa por tanto este proceso se puede expresar mediante la siguiente ecuación (4).

$$h_c \cdot A \cdot (T_g - T_s) = \dot{m}_h \cdot (H_s - H_g) \cdot \Delta H_v \quad (4)$$

### **Coeficientes de transferencia de calor**

Para que el modelo sea capaz de predecir el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso, con el mínimo de error, es necesario determinar las expresiones para los coeficientes de transferencia de calor por unidad de área del gas al sólido, del gas a la pared no cubierta y de la pared cubierta al sólido ( $h_{gs}$ ,  $h_{qw}$   $h_{sw}$ ) que se ajuste al objeto de estudio.

### **Calor transferido de la pared cubierta por el sólido**

El coeficiente de transferencia de calor de la pared cubierta al sólido  $h_{sw}$  juega un papel muy importante dentro del modelo de transferencia de calor [10]. A pesar de que la literatura recoge numerosas expresiones para determinar este coeficiente en la presente investigación se empleó la expresión (15) empleada por Wes, Drinkenburg [11] y referenciada por varios autores [10, 12] los cuales aseguran que se pueden usar para partículas en movimiento a corto e intermedio tiempo de contacto.

$$h_{sw} = 2 \cdot \sqrt{\frac{k_s \cdot \rho_s \cdot cp_s}{\pi \cdot t_c}} \quad (5)$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de contacto que se determina según la ecuación (16), que depende del ángulo de llenado y la velocidad de rotación.

$$t_c = \phi \cdot (2 \cdot \pi \cdot n)^{-1} \quad (6)$$

### **Transferencia de calor del gas a la pared no cubierta por el sólido**

Se considera que el coeficiente de transferencia de calor entre el gas libre en la superficie y la pared no cubierta por sólido es más importante que la transferencia de calor entre el gas y

la superficie del sólido [1]. Esto es debido al hecho de que es independiente de la velocidad de rotación, el tamaño de partícula y la inclinación del horno.

En este caso como el diámetro del cilindro es grande se asumen que la transferencia de calor por convección en su interior es análoga al esquema de flujo de gas sobre una pared plana [13] y se usa la ecuación (17) la cual fue empleadas por otros investigadores en objetos similares [14, 15] .

$$h_{gw} = 0.0981 \cdot (G_g)^{0.67} \quad (7)$$

### Transferencia de calor del gas a la superficie del sólido expuesta

Para determinar la transferencia de calor por convección del gas a la superficie del sólido expuesta se emplea la expresión (18) obtenida por Tscheng and Watkinson [16] la cual tiene en cuenta la velocidad de rotación del cilindro, el flujo del gas y el coeficiente de llenado.

$$h_{gs} = 0.46 \cdot \frac{k_g}{D_e} \cdot \text{Re}_g^{0.535} \cdot \text{Re}_w^{0.535} \cdot n^{-0.341} \quad (8)$$

Donde  $\text{Re}_g$  y  $\text{Re}_w$  son los números de Reynolds rotacional y del gas, los cuales se determinan por las siguientes ecuaciones (19, 20):

$$\text{Re}_g = \frac{V_g \cdot D_e}{\nu_g} \quad (9)$$

$$\text{Re}_w = \frac{\omega \cdot D_e^2}{\nu_g} \quad (10)$$

$$D_e = \frac{0.5 \cdot D \cdot (\phi - \sin(\phi))}{\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin(\phi)}{2}} \quad (11)$$

### Resultados y análisis

A partir del modelo matemático, se determinó el comportamiento de la temperatura del gas, del mineral, la pared (figura 3) y la variación de la masa a lo largo del secador (figura 7).

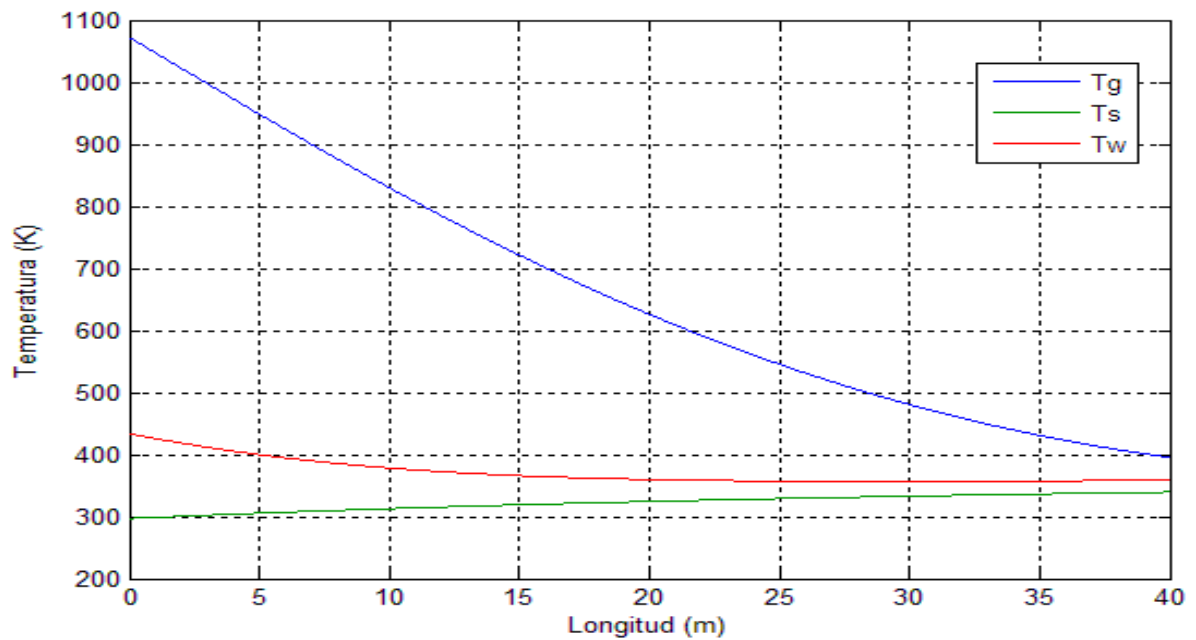


Figura 3. Comportamiento de las temperaturas en el secador

La figura 3 muestra las tendencias de la temperatura del gas, el sólido y la pared en el interior del secador estudiado. En la misma se evidencia que la que mayor variación es la que sufre el gas, reduciendo su temperatura desde los 800°C hasta 90°C, mientras que el sólido aumenta su temperatura desde 25°C hasta 60°C.

La siguiente figura muestra la variación de los distintos flujos de calor que intervienen en el proceso de secado. En la misma se puede apreciar que la que mayor incidencia tiene es la transferencia de calor con convección del gas al sólido seguido por el calor transferido por convección de la pared al sólido y la radiación del gas al sólido. La que tiene menor incidencia es la radiación de la pared al sólido.



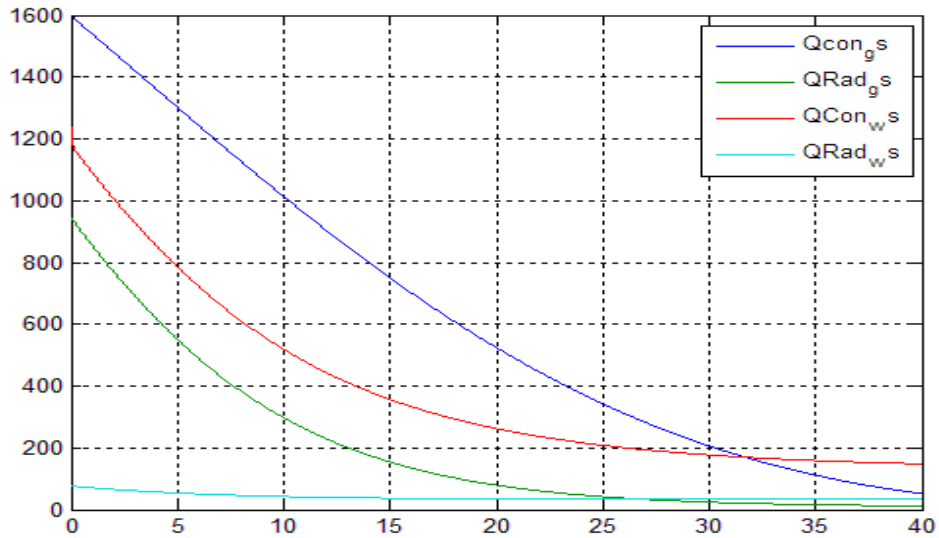


Figura (4). Variación de los flujos de calor .

A partir del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor se pudo comprobar que el mayor coeficiente es de gas al sólido. La siguiente figura muestra los valores obtenidos para los coeficientes de transferencia de calor por convección entre el gas –sólido- pared en  $W/m^2K$ .

Los resultados se corresponde con otros resultados obtenidos por otros investigadores tales como [7], [1, 14]

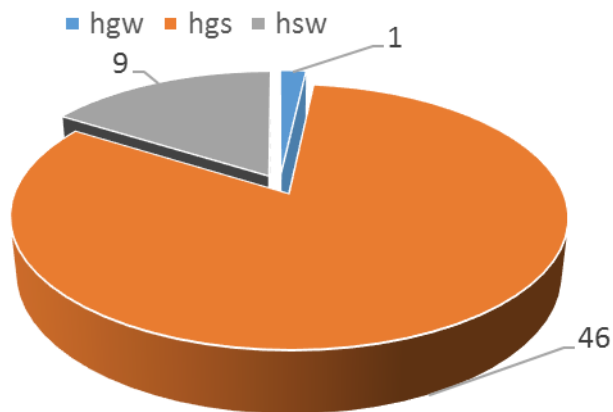


Figura 5 Coeficientes de transferencia de calor por convección  $W/m^2K$

## Conclusiones

Se determinaron las distribuciones de temperatura para la pared, el gas y el mineral en la cual se pudo comprobar que los resultados obtenidos se asemejan al proceso

En el análisis de la transferencia de calor se determinó que el que mayor peso tiene sobre el proceso de secado es la convección del gas al sólido y la que menor incidencia tiene es la radiación de la pared al mineral.

En el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor se pudo constatar que los resultados son muy similares a los obtenidos por otros investigadores.

## Nomenclaturas

$Q$	Calor; W
$A$	Área en contacto del sólido con el gas
$T$	Temperatura del gas
$H$	Entalpía
$L$	longitud
$\dot{m}_h$	Flujo del vapor de agua
$\Delta H_v$	Calor latente de vaporización
$h_t$	Coefficiente de transferencia de calor
$A_v$	Absorción;
$\varepsilon$	Emisividad
$C_p$	Calor específico
$K_1$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección entre el gas-sólido; $W/(m \cdot K)$
$K_2$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la Radiación entre el gas-sólido; $W/(m \cdot K)$
$K_3$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la convección entre el gas-pared; $W/(m \cdot K)$
$K_4$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación entre el gas-pared; $W/(m \cdot K)$
$K_5$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la conducción entre el pared-sólido; $W/(m \cdot K)$
$K_6$	Coefficiente de transferencia de calor variable por unidad de longitud para la radiación entre el pared-sólido; $W/(m \cdot K)$
$h_{gs}$	Coefficiente de transferencia del gas al sólido
$h_{gw}$	Coefficiente de transferencia de calor del gas a la pared
$h_{sw}$	Coefficiente de transferencia de calor de la pared al sólido
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

$k$	Conductividad térmica
$\rho$	Densidad
$n$	Velocidad de rotación
$\phi$	Ángulo medio de llenado
$t_c$	Tiempo de contacto del sólido con la pared
$Re$	Número de Reynolds
$f$	Coefficiente de llenado
$D$	Diámetro
$D_e$	Diámetro equivalente
$V$	Velocidad
$\nu$	Viscosidad cinemática
$G_g$	Flujo del gas

### Subíndices

$g$	Gas
$s$	Sólido
$w$	pared
$v$	Vapor de agua
$con(g_s)$	conducción del gas a la superficie del sólido no cubierto
$Rad(g_s)$	radiación del gas a la superficie del sólido no cubierto
$con(g_w)$	conducción del gas a la superficie de la pared no cubierta
$Rad(g_w)$	radiación del gas a la superficie de la pared no cubierta
$cond(w_s)$	Conducción de la pared al sólido en contacto con la pared
$Rad(W_s)$	Radiación de la pared al sólido
$(g_w)$	Gas a la superficie de la pared expuesta
$(W_s)$	Pared expuesta a la superficie del sólido
$(Wc_{se})$	Pared con el sólido en contacto con la pared
$ss$	Superficie del sólido
$pnc$	Pared no cubierta
$pc$	Pared cubierta

### Referencias

1. Agustini, S.S., A. Queck, and E. Specht, *Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns*. Heat Transfer Engineering, 2007.
2. Kim, Y.H., *Development of process model of a rotary kiln for volatile organic compound recovery from coconut shell*. Korean J. Chem. Eng., 2012. **28**(7): p. 1025-1031.
3. Qixiang. Xu and Shusheng. Pang, *Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass*. Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass, 2008. **26**(11): p. 1344-1350.
4. Lobato, F.S., et al., *Estimación of Drying parameters in rotary dryers using differential evolution*, in *6<sup>th</sup> International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice*. . 2008.
5. Harriot, W.L.M.J.C.S.P., *OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA*. 7ma ed, ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA. 2007, México, D. F.
6. Góngora-Leyva, E., et al., *Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" (Parte 1)* Minería y Geología, 2012. **28**(3): p. 50-69.
7. Gorog, J.P., T.N. Adams, and J.K. Brimacombe, *Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns*. Metallurgical and Materials Transactions B, 1982. **13B**: p. 153-163.
8. Ortiz, O.A., et al., *Steady state simulation of a rotary kiln for charcoal activation*. Latin American Applied Research, 2003. **33**: p. 51-57.
9. COULSON, J.M. and J.F. RICHARDSON *Ingeniería química. T2. Operaciones básicas*. 1981. 950 p.

10. Li, S.Q., et al., *A Mathematical Model of Heat Transfer in a Rotary Kiln Thermo-Reactor*. Chemical Engineering & Technology, 2005. **28**(12): p. 1480-1489.
11. Wes, G.W.J., A.A.H. Drinkenburg, and S. Stemerding, *Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor*. Powder Technology, 1976. **13**(2): p. 185-192.
12. Sriram, V. and P.S.T. Sai, *Transient Response of Granular Bed Motion in Rotary Kiln*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1999. **77**(3): p. 597-601.
13. Wang, W., et al., *Heat-transfer model of the rotary ash cooler used in circulating fluidized-bed boilers*. Energy & Fuels, 2010. **24**: p. 2570–2575.
14. Sass, A., *Simulation of the heat-transfer phenomena in a rotary kiln I & EC Process Desing and Development*, 1967. **6**(4): p. 532-535.
15. Riffaud, J.B., B. Koehret, and C. B., Brit. Chem. Eng. and Proc. Tech., 1972. **17**(5): p. 413-19.
16. Tscheng, S.H. and A.P. Watkinson, *Convective heat transfer in a rotary kiln*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1979. **57**: p. 433-443.