

# Determinación del índice de consumo de petróleo del horno de calcinación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

*Determination of the Index of Consumption of Petroleum of the Calcining Kiln of the Ernesto Che Guevara Commander Undertaking*

*Ing. Yarilys Gaínza-Delgado, ygainza@sn.moa.minem.cu, Ing. María Elena Magaña- Haynes, MSc. Armando Rojas Vargas, MSc. Crispin Sánchez Guillén*

*Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Moa, Holguín, Cuba*

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la realización de los balances de masa y energía en el horno de calcinación de la empresa comandante Ernesto Che Guevara, para la determinación del índice de consumo del petróleo empleado para la obtención del óxido de níquel a través de la descomposición térmica del carbonato básico de níquel. Se demostró que para una producción de carbonato básico de níquel de 12 t/h con 69 % humedad, es necesario alimentar alrededor de 1100 kg/h de combustible, para un índice de consumo de 91,67 kg de petróleo por tonelada de carga.

*Palabras clave: calcinación, óxido de níquel, carbonato básico de níquel.*

---

## Abstract

This work presents the results obtained in carrying out the mass and energy balances in the calcining kiln of the company commander Ernesto Che Guevara, for determining the consumption index of petroleum used for obtaining nickel oxide through thermal decomposition of the basic nickel carbonate. It was shown that for a production of basic nickel carbonate of 12 t / h with 69% moisture, it is necessary to feed about 1100 kg / h of fuel, for an consumption index of 91.67 kg of fuel per ton of load.

*Keywords: calcining, nickel oxide, basic carbonate of nickel.*

## Introducción

La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. La planta niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) emplea este proceso para la obtención del óxido de níquel a partir de la descomposición química del carbonato básico de níquel ( $\text{NiCO}_3$ ) en un horno rotatorio (kiln), mediante la

combustión del petróleo precalentado. El uso racional y eficiente de este recurso o sea del combustible constituye una necesidad imperante en los momentos actuales de nuestro país, debido a la oscilación de los precios en el mercado internacional, pues en estos momentos están bajos, principalmente en las industrias consumidoras de este portador energético como son las del níquel.

Estudios realizados por diversos autores han diagnosticado la calcinación del carbonato de níquel aportando los datos necesarios para la determinación del calor de disociación [8], a través de la realización de los balances de masa y energía en el horno [1] para el cálculo del índice de consumo de combustible utilizado en el proceso energético, teniendo en cuenta que los balances de masa y energía (BM y BE) son una de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos para contabilizar los flujos másicos y de energía entre un determinado proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran.

Para operar con un consumo mínimo posible de petróleo, es decir, de forma eficiente, se debe lograr una combustión adecuada. Esto se consigue manteniendo una relación correcta aire-petróleo y vapor de atomización.

Una combustión adecuada garantiza, además, una atmósfera favorable dentro del horno para la reacción química y evita la presencia de azufre en el producto calcinado. Entre 20 y 40 % del aire necesario para la combustión (aire primario), se introduce en el horno junto con el combustible, la otra parte del aire necesario (aire secundario), se obtiene mediante el tiro inducido y penetra al horno a través del sistema de descarga del producto final, contribuyendo a su enfriamiento, por tanto, entra caliente al horno. Por otra parte, el tiro inducido modifica la forma de la llama, lo que permite transportar calor de una zona a otra del horno.

Producir la mayor cantidad posible de óxido de níquel se logra manteniendo un flujo alto y estable de material dentro del horno, lo que depende básicamente de la operación de los equipos precedentes, así como de los otros subprocesos de la planta.

El presente trabajo tiene como objetivo la determinación del consumo de combustible requerido por el horno de calcinación de la ECG en las condiciones actuales de operación, mediante los balances de masa y energía.

### *Materiales y métodos*

Para la realización del trabajo se tomaron muestras de carbonato de níquel durante el día, para conocer la composición química de la carga alimentada al horno de calcinación, así como del óxido de níquel salido del calcinador, las cuales fueron analizadas.

Los parámetros fundamentales de operación del horno se tomaron a través de sistema de supervisión y control automatizado CITECT (carga alimentada al horno, la temperatura en las diferentes etapas del proceso de calcinación, el consumo real de combustible, etcétera). Se realizaron determinaciones de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> con el equipo ORSAT. Además se midió la temperatura en la carcasa del horno en las diferentes zonas con un pirómetro óptico.

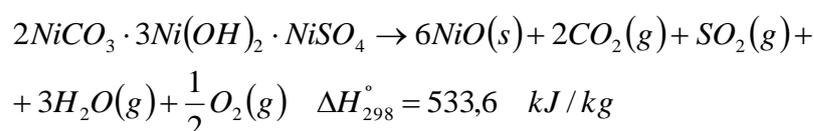
Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio analítico de la Unidad de Proyectos Nicaro (UPN) del Centro de Investigaciones del níquel empleando métodos gravimétricos simples y espectrofotometría de absorción atómica; para la determinación de la humedad en el carbonato básico de níquel se utilizó en paralelo el método clásico y mediante una balanza analítica con secado infrarrojo.

Para llegar al proceso de calcinación se transcurren por cuatro zonas fundamentales (ver tabla 1):

Zona 01: Zona de los Gases. Ocurre el intercambio de calor entre los gases salientes y el material. Se elimina el agua embebida y parcialmente, la de constitución de las moléculas [7].

Zona 02: Zona de cadena. Se inicia la pérdida del agua de constitución.

Zona 03: Zona de Calcinación. Ocurre la calcinación, consistente en la descomposición del carbonato, la cual se puede representar por la siguiente ecuación:



Zona 04: Zona de combustión. Tiene lugar la combustión.

Zona 05: Zona de enfriamiento.

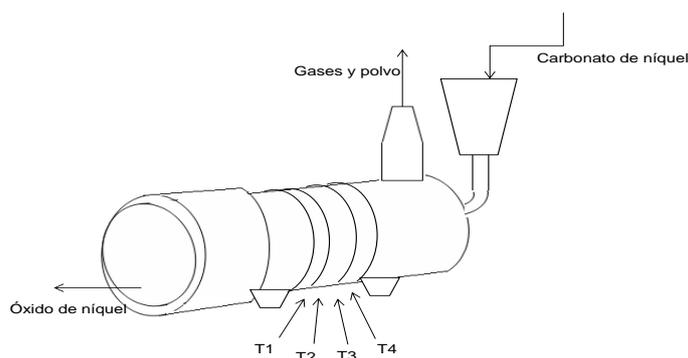
**Tabla 1**  
**Zonas de calcinación**

Zona	T(°C) Calcinador 2
Zona 1 Gases	300-380
Zona 2 Cadena	480-580
Zona 3 Calcinación	700-900
Zona 4 Combustión	600-1180
Enfriamiento	

El horno consiste en un cilindro rotatorio de acero (ver figura 1) con las características apreciadas en la tabla 2, posee una ligera inclinación con respecto a la horizontal y está revestido interiormente con aislante refractario. El material se alimenta por el extremo superior, la inclinación del cilindro y su rotación permiten que el material se desplace a través de las distintas zonas.

**Tabla 2**  
**Características del horno de calcinación**

Ítems	U/M	Especificación
Longitud	m	50,5
Diámetro	m	3,15
Velocidad de rotación	rph	48
Material	-	Acero Termoresistente



**Fig. 1 Esquema generalizado Horno de calcinación.**

El calor en el horno se provee mediante la combustión de petróleo atomizado con vapor y mezclado con aire en un quemador situado en la parte inferior. Los gases que se producen durante el proceso son extraídos continuamente mediante un ventilador de tiro inducido, por la parte superior; mientras que el polvo arrastrado por éstos se recupera en un ciclón y un precipitador

electrostático dispuestos en serie y se devuelve al horno a través de transportadores sin fin.

Los cálculos para el balance de masa y energía se realizaron aplicando la ley de conservación de masa y de energía o primera ley de la Termodinámica, representando primeramente todas las corrientes entrantes y salientes del horno como lo indica la figura 2.

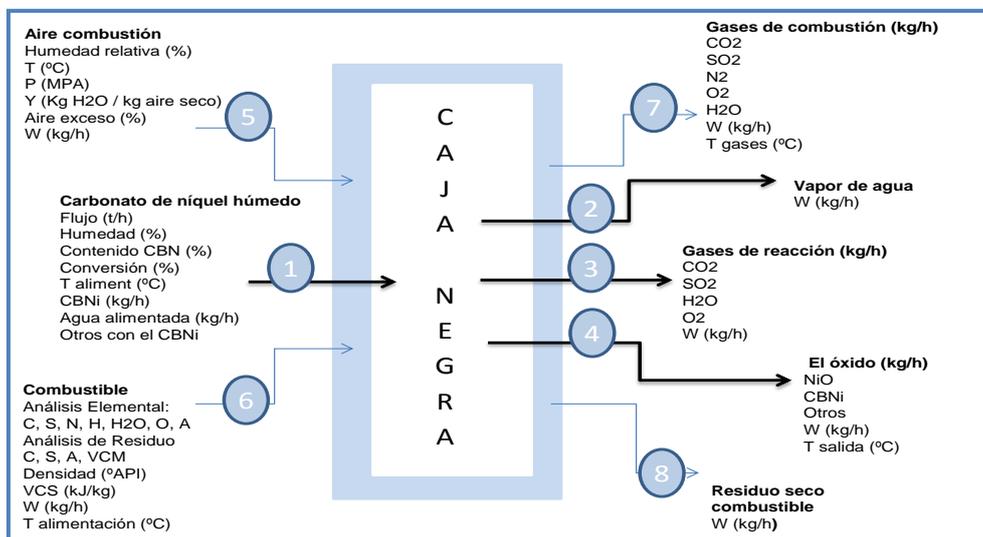


Fig. 2 Modelo de caja negra

Para las corrientes: C1, C2, C3, C4

- Calor para evaporar el agua embebida en el Carbonato Básico de Níquel alimentado:

$$Q = W_{H_2O} \cdot \Delta H_1^2 = W_{H_2O} \cdot (H_2 - H_1)$$

Las entalpías se extraen de las tablas Keenan (1970), a las temperaturas y presiones de las corrientes 1 y 2.

- Calor para la reacción química:

$$Q = W_1 \cdot \Delta H_1^0 + \sum FSLR_j \cdot \Delta H_{R,j}^0 + W_{NiO} \cdot \Delta H_0^4 + W_3 \cdot \Delta H_0^3$$

$$Q = W_1 \cdot cp_{CBNi} \cdot (T_0 - T_1) + W_{NiO} \cdot \Delta H_R^0 + W_{NiO} \cdot cp_{NiO} \cdot (T_4 - T_t) + W_{GS} \cdot cp_{GS} \cdot (T_3 - T_t)$$

Para la combustión, a partir del análisis elemental del combustible, se aplica la metodología descrita por Pons Hernández (1987). Las propiedades físicas de

los gases y sólidos se obtuvieron del Perry (1967) y Hougen, Watson y Ragatz (1967).

*Análisis y discusión de los resultados*

Los datos empleados como base de cálculo para la realización de los balances fueron los siguientes:

**Tabla 4**  
**Condiciones base para el BM y BE**

Ítems	U/m	Especificación
Productividad	t/h	12
Humedad del CBNi	%	69
Temperatura CBNi alimentado	°C	65
Valor calórico	kJ/kg	41 588,96
Temperatura entrada petróleo	°C	118
Análisis Elemental del petróleo:		
C	%	83,70
S	%	2,50
N	%	0,88
H	%	11,85
H <sub>2</sub> O	%	0,40
O	%	0,62
A	%	0,05
Análisis de Residuo		
C	%	0,0
S	%	0,0
A	%	100,0
VCM	%	0,0

Como resultado del balance de masa y energía se determinaron los índices siguientes:

Balance de masa

El balance de masa (BM) se muestra en las tablas 5, 6, 7, y 8.

Entradas:

**Tabla 5**  
**BM, corrientes 1 de la figura 2**

Alimentado	Ni	C	O <sub>2</sub>	S	H <sub>2</sub>	Otros	Total
2NiCO <sub>3</sub> ·3Ni(OH) <sub>2</sub> ·NiSO <sub>4</sub>	1 876,79	128,02	1 363,54	170,87	31,98		<b>3 571,20</b>
H <sub>2</sub> O (en el NiCO <sub>3</sub> húmedo)			7 359,49		920,51		<b>8 280,00</b>
Otros						148,80	<b>148,80</b>
<b>Total</b>	<b>1 876,79</b>	<b>128,02</b>	<b>8 723,03</b>	<b>170,87</b>	<b>952,49</b>	<b>148,80</b>	<b>12 000,00</b>

**Tabla 6**  
**BM, corrientes 5, 6 de la figura 2**

Alimentado	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Otros	Total
Aire	4 226,1	13989,8	306,027 8		18 521,97
Combustible				1100,00	1 100,00
<b>Total</b>	<b>4 226,10</b>	<b>13 989,84</b>	<b>306,03</b>	<b>1 100,00</b>	<b>19 621,97</b>

## Salidas

**Tabla 7**  
**BM, corrientes 2, 3, 4 de la figura 2**

Productos	Ni	C	O <sub>2</sub>	S	H <sub>2</sub>	Otros	Total
NiO	1 820,487		495,99				<b>2 316,48</b>
CO <sub>2</sub>		124,18	330,66				<b>454,84</b>
SO <sub>2</sub>			165,33	165,74			<b>331,07</b>
H <sub>2</sub> O			247,99		31,02		<b>279,01</b>
O <sub>2</sub>			82,66				<b>82,66</b>
NiCO <sub>3</sub> .3Ni(OH) <sub>2</sub> .NiSO <sub>4</sub>	56,30	3,841	40,91	5,13	0,959		<b>107,14</b>
H <sub>2</sub> O (entró en el Carbonato Básico de Níquel húmedo)			7359,49		920,511		<b>8 280,00</b>
Otros						148,8	<b>148,80</b>
<b>Total</b>	<b>1 876,79</b>	<b>128,02</b>	<b>8 723,03</b>	<b>170,87</b>	<b>952,49</b>	<b>148,80</b>	<b>12 000,00</b>

**Tabla 8**  
**BM, corrientes 5, 6 de la figura 2**

	C	S	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Otros	Total
Residuo (s)						0,55	0,55
CO <sub>2</sub>	921,467			2453,67			33 75,13
SO <sub>2</sub>		27,55		27,48			55,03
N <sub>2</sub>			13 999,52				13 999,52
O <sub>2</sub>				1 749,12			1 749,12
<b>Total</b>				1 314,00	164,35		1 478,36
	<b>921,47</b>	<b>27,55</b>	<b>13 999,52</b>	<b>5 544,28</b>	<b>164,35</b>	<b>0,55</b>	<b>20 657,72</b>

## Balance de Energía

Se calculó:

- Energía consumida para la evaporación del agua embebida en el carbonato (Q1).
- Energía consumida en la descomposición del carbonato (Q21 y Q22).
- Energía consumida para la evaporación del agua que contiene el combustible, que sale como vapor sobrecalentado (Q3).

- Energía consumida para la formación del agua por la combustión del hidrógeno del combustible (Q4).
- Energía consumida para la evaporación del agua que contiene el aire (Q5).
- Energía perdida por el calor contenido en los productos gaseosos secos de combustión que salen del sistema (Q6).
- Energía perdida por la combustión incompleta, librándose CO (igual a cero), (Q7).
- Energía perdida por el carbono no quemado que aparece en los productos (igual a cero), (Q8)
- Energía perdida debido a radiación, convección y conducción (Q9).

Los resultados de los cálculos de la energía que consume el horno de calcinación de carbonato de níquel de la ECG se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9**  
**Balance de energía en el horno de calcinación**

Balance de energía	Para un flujo de petróleo (Kg/h)			
	830		1100	
	kW	%	kW	%
Q1: Evaporación del agua embebida en el Carbonato Básico de Níquel	7 017,7	61,1	7 017,7	55,5
Q21: Descomposición del NiCO <sub>3</sub>	1 434,6	12,5	1 434,6	11,4
Q22: Productos gaseosos secos del CBNi	1 332,2	11,6	1 765,6	14,0
Q3: Evaporación del agua del combustible	2,6	0,0	3,5	0,0
<b>Q4: Combustión del hidrógeno</b>	704,6	6,1	933,8	7,4
Q5: Evaporación del agua del aire	48,4	0,4	64,1	0,5
<b>Q6: Productos gaseosos secos del combustible</b>	371,2	3,2	651,9	5,2
Q7: Combustión incompleta	0,0	0,0	0,0	0,0
Q8: Carbono no quemado	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Q9: Radiación, convección y conducción</b>	575,3	5,0	762,5	6,0
<b>QN (energía total necesitada)</b>	11 486,5	100,0	12 633,6	100,0
<b>QE (energía total alimentada)</b>	9 588,6		12 707,7	
Diferencia (QE-QN)	-1 898,0		74,1	

Se puede apreciar que para una productividad en el calcinador de 12 t/h, una humedad de 69 %, cuando se alimenta un flujo de petróleo de 830 kg/h, el calor alimentado no es suficiente para lograr el proceso de calcinación, por lo que en este caso es necesario alimentar alrededor de 1100 kg/h de combustible.

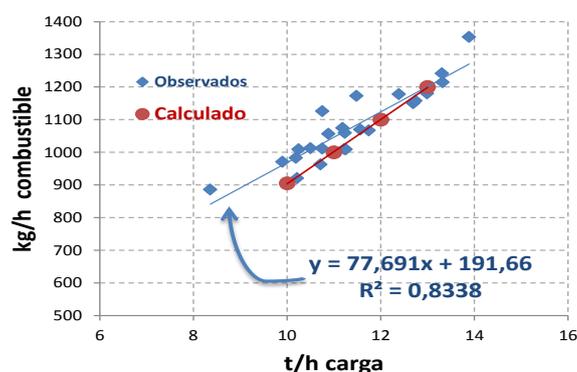
Si se quiere reducir el consumo de combustible en el proceso de calcinación del carbonato, es necesario disminuir la humedad con que el mismo entra al horno, para ello se recomienda:

- Adecuado control de la operación durante la filtración del carbonato básico de níquel.
- Aplicación en el proceso de destilación del carbonato básico de níquel, de la adición de licor fresco por un lateral del alambique, para enriquecer en  $\text{CO}_2$  la molécula del carbonato básico de níquel.
- Aplicar el control de la destilación por pH para minimizar las pérdidas de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  y la reincorporación del azufre a la molécula de carbonato.

Además es preciso reducir las pérdidas de calor que se producen en el calcinador por radiación, convección y conducción, aprovechar los gases de salida, para precalentar el licor fresco alimentado a destilación del carbonato de níquel, usando un intercambiador de calor de gases incondensables.

Se debe observar el tiempo de retención de los gases en el calcinador, para aprovechar el calor que poseen, manteniendo las temperaturas de las zonas del calcinador en el rango de operación establecido y consumir el combustible necesario.

En la figura 3 se muestra el consumo de petróleo para diferentes productividades en el calcinador de la ECG, valores observados (rombos) y calculados para diferentes productividades (círculos).



**Fig. 3 Consumo de petróleo en el calcinador de ECG para diferentes productividades.**

En la tabla 10 se presentan los datos de operación del calcinador de ECG en julio 2014.

**Tabla 10**  
**Operación del calcinador de ECG, julio 2014**

<b>Productividad (t/h)</b>	<b>Combustible (kg/h)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Índice consumo (kg/t)</b>
13	1200	0,2	92,31
12	1100	0,2	91,67
11	1000	0,1	90,91
10	905	0,2	90,50

### Conclusiones

- 1. Se realizó el balance de masa y de energía del horno de calcinación de la ECG, determinándose que para una producción de carbonato básico de níquel de 12 t/h con humedad de 69 %, es necesario alimentar alrededor 1100 kg/h de combustible, para un índice de consumo de 91,67 kg de petróleo /t carga.**

### Bibliografía

1. CHANG, A.; MOLINA, R.; VEGA, E. y ORTIZ, M. "Balance energético del calcinador de carbonato básico de níquel con adición de sulfuro de níquel. Consideraciones metodológicas". *Revista Minería y Geología*. 2003, núm. 3-4, pp. 59-64.
2. CRUZ VIERA, L, PONS HERNÁNDEZ A. *Introducción a Ingeniería Química*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, cop.1985. ISBN 959-13-0253-3.
3. H. KEENAN, J. *Steam Tables and Mollier Diagram*. La Habana: Instituto del Libro, p. 50. 1970.
4. HOUGEN, WATSON y RAGATZ. "Principios de los Procesos Químicos". Parte I. Ed. Reverté, Barcelona, 1975, p. 510.
5. PONS HERNANDEZ, A. Y otros. *Termodinámica técnica*. La Habana: Pueblo y Educación. 1987, p. 485.
6. PERRY, CHILTON, KIRKPATRICK. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Sección "Propiedades de Transporte". 3-206; 3-196. t.I. Edición Revolucionaria. La Habana, 1967.
7. RAMIREZ, M., "Simulación y control borroso de un horno de calcinación de níquel". *Revista Tecnología Química*, 1998, Vol.18 núm. 1 y 2, p. 31-39.
8. ROMERO, M.M. "Cinética de las reacciones topoquímicas y la caracterización de productos intermedios de la industria níquelífera". IMRE, Universidad de la Habana (tesis de doctorado en Ciencias Químicas). 1991, p.139.