



Energy efficiency in the zeolite impact crushing plant of San Andrés (Holguín, Cuba)

José Ramón Hechavarría-Pérez ^a, Alfredo L. Coello-Velázquez ^b, Fernando Daniel Robles-Proenza ^a
& Juan María Menéndez-Aguado ^c

^a Universidad de Holguín, Holguín, Cuba. jhperez@facing.uho.edu.cu

^b Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba. acoello@ismm.edu.cu

^c Escuela Politécnica de Mieres. Universidad de Oviedo, Oviedo, España. maguado@uniovi.es

Received: October 9th, 2014. Received in revised form: July 29th, 2015. Accepted: July 31th, 2015.

Abstract

The present work deals with the impact crusher energy efficiency at San Andrés Zeolitic Plant. Varying the operational parameters levels (rotor velocity, hammer row number and crusher capacity) were carried up two experimental series: First series was aimed to obtain the influence of the operational parameters on the power consumed by the crusher motor; the second series evaluated the crusher specific energy consumption behavior. First series empirical model obtained describes the influence of operational parameters on power consumption. Also the relationship among specific energy consumption and crusher speed and capacity were obtained. The most efficient operational regimen corresponded to 1100 rpm of the rotor velocity, 2 hammer row numbers and 15 t/h of crusher capacity.

Keywords: Energy Consumption. Energy efficiency. Impact crushers.

Eficiencia energética en la trituración por impactos en la planta de zeolitas de San Andrés (Holguín, Cuba)

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación a escala industrial de la eficiencia energética de una trituradora de martillos en la planta de zeolitas de San Andrés. Variando los niveles de las variables de operación (velocidad del rotor, cantidad de martillos y productividad del triturador), se realizaron dos series de ensayos para determinar su influencia en la potencia consumida por el motor de la trituradora; y la influencia sobre energía específica en trituración. El modelo del experimento obtenido de la primera serie de ensayos demostró la influencia de las variables de operación en la potencia consumida por el motor de la trituradora. La relación entre la energía consumida en la trituración y productividad y velocidad de la trituradora mostró su fuerte influencia en los indicadores energo-tecnológicos. El régimen más eficiente corresponde a los niveles de 1100rpm de velocidad del rotor, 2 martillos y 15 t/h de productividad.

Palabras clave: Consumo de energía. Eficiencia energética. Indicadores energo-tecnológicos. Trituración por impacto.

1. Introducción

El uso racional de la energía en los procesos industriales, resulta de gran importancia y actualidad. Los procesos de trituración y molienda de materiales consumen enormes cantidades de energía.

Se estima que de toda energía generada en el mundo, de un 3 a un 4 %, se destina a las operaciones de reducción de tamaño [4], y solo en Estados Unidos a estas operaciones se

dedica el 29,3% de toda la energía consumida en la minería. Estos elementos muestran que la mejora de la eficiencia energética de las operaciones de reducción de tamaño es de interés de un grupo importante de científicos e investigadores [2,15].

A mediados del siglo XIX, Rittinger [10,12] enuncia un modelo que relaciona la energía de fragmentación con el tamaño de las partículas fragmentadas. Modelos similares fueron postulados por Kirpichov y Bond [1,3,11]. Estas

relaciones consideran que la energía consumida en la reducción de tamaño, depende de las características del mineral y de la variación del tamaño antes y después de la trituración (ec. 1).

$$E = W \cdot \left(\frac{1}{p^x} - \frac{1}{f^x} \right) \quad (1)$$

Donde: E es la energía específica necesaria para la fragmentación de las partículas, kWh/t; W representa un índice energético, kWh/t; x es un valor constante para un mismo modelo, mientras que f y p representan el tamaño del material de alimentación y del producto final, respectivamente.

Al margen de las valiosas críticas científicas realizadas por Hukki [9], Coello [1], Mosher y Tague [13], Morrell [12], el modelo de Bond aun es empleado ampliamente en el diseño y construcción de molinos y trituradoras [3, 4, 14].

Hukki [9] y Morrell [12] exponen modelos donde el parámetro x de la ec. (1) es una función que depende del tamaño de las partículas. En las trituradoras de impacto, esto concuerda con el hecho de que la energía cinética necesaria para la fragmentación de las partículas de mineral varía con su tamaño, de acuerdo a varios autores, como es recogido por Hechevarría [8] y Osorio [14].

A pesar de que los modelos antes mencionados de Hukki, Coello y Morrell representan una mejor aproximación de los fenómenos de reducción de tamaño, sin embargo, su empleo se visto limitado por las complejidades asociadas al aparato experimental necesario para su implementación.

Al margen de las limitaciones que enfrenta la modelación y simulación de la trituración por impacto, mucho se ha avanzado en los temas relacionados con el comportamiento granulométrico, los cuales han sido tratados con amplitud en los trabajos de Shi y Kojovic [18,19], Hechavarría [8], Coello-Velázquez [5] y Da Cunha [6].

Con respecto al estudio del comportamiento energético, Taggart [20] de forma gráfica lo presenta para una trituradora de impacto tomando como material la grava de río. Los trabajos de Hechavarría [8], Shi y Kojovic [18], constituyen interesantes evidencias que expresan las tendencias presentadas por Taggart para diferentes minerales y maquinarias. Shi [19] propone un interesante modelo que relaciona la energía consumida por la trituradora de impacto con algunas variables de operación partiendo de un volumen apreciable de datos experimentales.

Nikolov [8] considera la velocidad de impacto como variable importante en la modelación de trituración. Sadrai [16] por su parte, reporta la incidencia de la velocidad de impacto en su eficiencia energética. Coello [3] demuestra la influencia del régimen operacional en los indicadores energo-tecnológicos de la molienda de minerales a escala de laboratorio, semi-industrial e industrial. Hechavarría [8] reporta la influencia de la velocidad del rotor, la cantidad de martillos y la productividad del molino en la potencia consumida por el motor de la trituradora de impacto.

Estas tendencias muestran que la investigación experimental de la influencia de las variables de operación en los indicadores energo-tecnológicos de las de la trituración

por impacto sigue siendo una herramienta indispensable en su estudio y búsqueda de regímenes tecnológicos de operación más eficientes.

Es objetivo del presente trabajo exponer los principales resultados de la evaluación de eficiencia energética de la trituradora de impacto Litpman de la planta de zeolitas de San Andrés.

2. Material y método

El trabajo se realizó en una trituradora tipo Litpman 24 X 18 en la planta zeolitas de San Andrés, con dimensiones del rotor (diámetro x ancho) 520 X 410 mm y de una productividad máxima de 20 t/h. La composición granulométrica de la roca alimentada fue determinada por el análisis de tamiz utilizando los tamices de 25,0; 12,0; 6,5; 5,0; 3,5 y 1,0mm. Las muestras fueron tomadas garantizando la representatividad de las mismas.

Para la realización del trabajo considerando las condiciones industriales del objeto, se decidió realizar dos series de experimentos: uno orientado al estudio del comportamiento de la potencia consumida por el motor del triturador y el otro, dirigido a la valoración del comportamiento de la energía específica consumida en la trituración. Para el primer caso, la velocidad del rotor de la trituradora de varió en dos niveles (1100 rpm y 1500 rpm), mientras que la cantidad de martillos fue de 2 y 4. Para cada combinación de estas dos variables, la productividad de la trituradora se varió en los niveles de 0, 5, 10 y 15 t/h, para un total de 16 ensayos con 5 réplicas cada uno. La duración de los ensayos fue de 8 horas (un turno de trabajo). Las variables operacionales y sus niveles de variación se muestran en la Tabla 1. Durante cada ensayo fue medida la potencia consumida por el motor del triturador con un analizador marca Chauvin de nacionalidad francesa debidamente verificado por la Oficina Territorial de Normalización (OTN). A partir de estos resultados fue calculada para cada ensayo, la energía consumida por cada tonelada de mineral alimentado a la trituradora.

Para el segundo caso, las tres variables operacionales fueron variadas solo en dos niveles (Tablas 3 y 4 del Apéndice). La composición granulométrica y la productividad de las clases (8-3mm), (3-1mm) y (1-0mm) que constituyen los productos finales fueron determinadas según la metodología reportadas en Coello [1] y Menéndez-Aguado [10,11]. Las mediciones de la potencia consumida fueron determinadas de forma similar al experimento anterior, las mediciones anteriores fueron consideradas, a partir de la cual fue determinada la energía consumida por cada tonelada de mineral triturado (eficiencia energética).

3. Análisis y discusión de los resultados

La composición granulométrica del producto alimentado a la trituradora aparece en la Fig. 1.

Según el grado de linealidad de la característica granulométrica mostrada en la Fig. 1, la roca zeolítica material alimentado a la trituradora LIPTMAN es altamente homogénea, no solo desde el punto de vista granulométrico, sino también, desde el punto de vista de su composición substancial que finalmente determina sus propiedades físicas y físico-mecánicas.

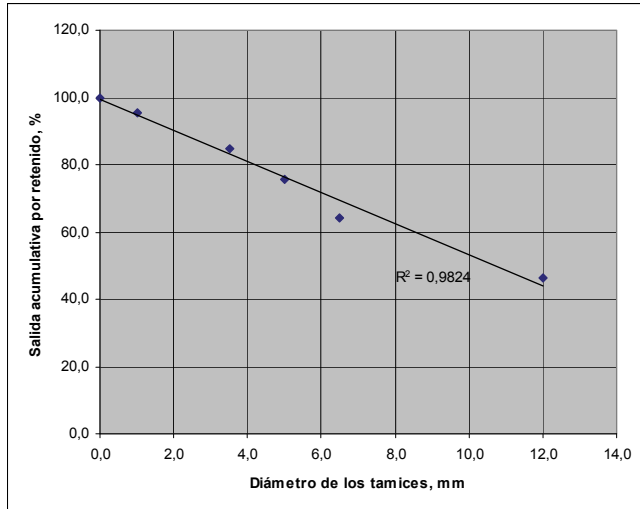


Figura 1. Característica granulométrica del material alimentado a la trituradora LITPMAN.
Fuente: Elaboración propia

El estudio de la influencia de las variables operacionales sobre la potencia consumida por el motor de la trituradora aparece en la Tabla 1. El análisis de varianza del experimento demuestra que la velocidad del rotor (V), la productividad de la trituradora (Q) y el número de filas de martillos (M) resultan significativamente influyentes en el comportamiento de la potencia consumida por el motor de la trituradora para una probabilidad de 95 %.

El modelo expresado en la ec. 2, sintetiza la dependencia entre las variables estudiadas.

$$N = 0,011 \cdot V + 0,799 \cdot Q + 0,736 \cdot M \quad (2)$$

La comparación entre los valores experimentales y calculados por el modelo mostrado en la Fig. 2 valida la reproducibilidad de modelo. El valor del coeficiente de correlación (R=0,97), el estadígrafo de Chi cuadrado y las comparaciones de la media y la varianza confirman que el modelo (1) es una buena aproximación a los valores experimentales.

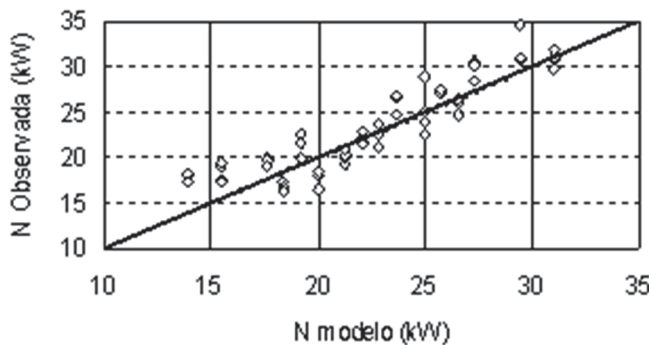


Figura 2. Relación entre los valores experimentales y modelados de la potencia consumida por el motor de la trituradora.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 1

Influencia de las variables operacionales en la potencia consumida por el motor de la trituradora LITPMAN

N	Velocidad rotor, rpm	Cantidad de martillos, n	Productividad, t/h	Potencia, kW
1	1100	2	0	17,7
1	1100	2	0	17,7
2	1100	2	5	19,4
3	1100	2	10	20,1
4	1100	2	15	25,1
5	1100	4	0	18,3
6	1100	4	5	21,4
7	1100	4	10	22,8
8	1100	4	15	25,5
9	1500	2	0	16,7
10	1500	2	5	22,1
11	1500	2	10	27,3
12	1500	2	15	33,2
13	1500	4	0	17,4
14	1500	4	5	26,2

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados confirman los trabajos de Coello [3] y Coello-Velázquez [4,5], quienes demostraron que para la molienda del mineral laterítico las variables operacionales también influyen significativamente tanto en la potencia consumida por el motor del molino, como en la energía consumida por tonelada de mineral alimentado y por tonelada de mineral molido.

La Fig. 3 muestra la influencia de la productividad en la alimentación de la trituradora y la velocidad del rotor en la energía consumida en la trituración del material. Resulta interesante que la curva de dependencia de la energía consumida por tonelada de mineral alimentado de la productividad de la trituradora se desplaza hacia el incremento del primero con iguales características, al aumentar la velocidad de rotor de 1100 hasta 1500. Siendo así, podría plantearse que el incremento de la velocidad del rotor en los niveles estudiados, incrementa el consumo de energía sin un aporte substancial en la trituración de las rocas zeolíticas.

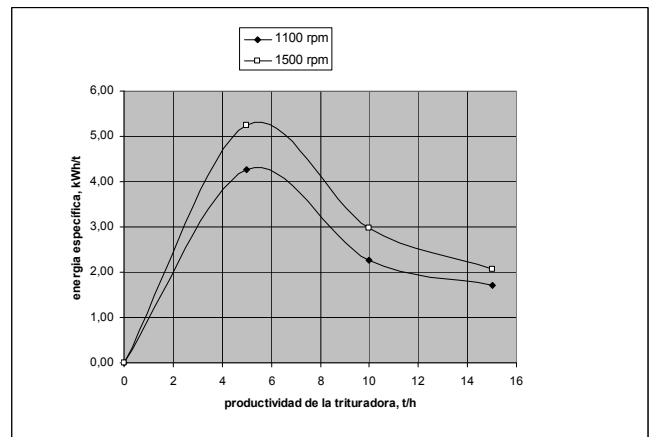


Figura 3. Comportamiento de la energía consumida por tonelada de mineral alimentado en función de la productividad de la trituradora y la velocidad del rotor.

Fuente: Elaboración propia

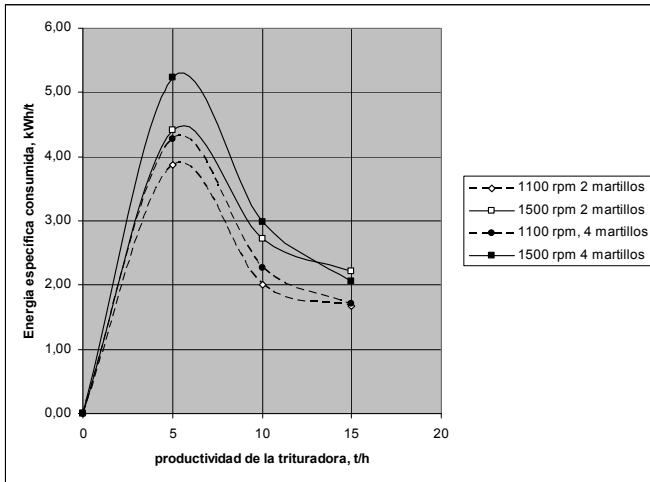


Figura 4. Comportamiento de la energía específica consumida tonelada de mineral alimentado.
Fuente: Elaboración propia

Estos elementos se corroboran con los resultados de la Fig. 4. Variando la velocidad del rotor de la trituradora y la cantidad de martillos se obtienen una familia de curvas regulares del comportamiento de la energía específica, donde la velocidad del rotor influye con más fuerza sobre la energía específica consumida en la trituración de las rocas zeolíticas para los primeros intervalos de productividades (hasta 10t/h).

Tomando como referencia los trabajos de Bond, Coello [3] considera que para evaluar rigurosamente la eficiencia del molino y de la reducción de tamaño en general, el mejor indicador es el que considera el contenido de la clase nuevamente formada. Es obvio que este indicador de la eficiencia energética tiene en cuenta la diferencia en el contenido de la clase de cálculo de producto final y el producto inicial. Comparando los indicadores de la energía consumida por cada tonelada de mineral triturado, es posible seleccionar el régimen tecnológico más eficiente.

Los resultados de la eficiencia energética de la trituradora aparecen en la Tabla 2. Estos resultados muestran que las variables operacionales estudiadas influyen decididamente en la eficiencia energética de la trituración de la zeolita en el triturador LITPMAN.

Así, el mejor régimen tecnológico corresponde a los niveles operacionales de 1100 rpm de velocidad de rotor, dos martillos y una productividad de 15 t/h. La eficiencia energética del proceso resultante es de 4,4 kWh/t; 4,7 kWh/t y 7,5 kWh/t para los productos (8-3mm), (3-1mm) y (1-0mm) respectivamente.

Esta regularidad es consecuente con los preceptos teóricos relacionados con la necesidad de incrementar el consumo energético al disminuir el tamaño de trituración.

4. Conclusiones

Los resultados del trabajo muestran que las variables operacionales estudiadas influyen significativamente en la potencia consumida por el motor de la trituradora. El modelo del experimento demuestra que tanto la velocidad del rotor como la cantidad de martillos y la productividad influyen positivamente en la potencia consumida por el motor.

Tabla 2
Influencia de las variables operacionales en los indicadores energéticos del triturador LITPMAN.

Variables de operación			Eficiencia del triturador, kWh/t		
Velocidad del rotor, rpm	Cantidad de Martillos, n	Productividad del triturador, (t/h)	clase (8-3mm)	clase (3-1mm)	clase (1-0mm)
1100	2	5	14,1	9,6	15,0
1100	2	15	4,4	4,7	7,5
1100	4	5	12,6	10,8	19,8
1100	4	15	4,2	5,1	8,0
1500	2	5	15,3	11,0	15,4
1500	2	15	6,9	5,3	9,0
1500	4	5	21,3	12,4	17,6
1500	4	15	5,8	5,6	7,0

Fuente: Elaboración propia

5. Apéndice

Tabla 3.
Comportamiento de la salida de las clases granulométricas en función de las variables operacionales.

Variables de operación			salida de las clases, %		
Velocidad del rotor, rpm.	Cantidad de Martillos, n	Productividad del triturador, (t/h)	clase (8-3mm)	clase (3-1mm)	clase (1-0mm)
1100	2	5	27,6	40,4	25,8
1100	2	15	38,0	35,6	22,4
1100	4	5	34,0	39,5	21,6
1100	4	15	40,6	33,3	21,2
1500	2	5	28,9	40,1	28,8
1500	2	15	32,0	42,0	24,7
1500	4	5	24,6	42,3	29,7
1500	4	15	35,6	36,7	29,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.
Comportamiento de la productividad de los productos triturados en función de las variables operacionales.

Variables de operación			productividad de los productos finales, t/h		
Velocidad del rotor, rpm.	Cantidad de Martillos, n	Productividad del triturador, (t/h)	Q (3-8mm)	Q (1-3mm)	Q (1-0mm)
1100	2	5	1,4	2,0	1,3
1100	2	15	5,7	5,3	3,4
1100	4	5	1,7	2,0	1,1
1100	4	15	6,1	5,0	3,2
1500	2	5	1,4	2,0	1,4
1500	2	15	4,8	6,3	3,7
1500	4	5	1,2	2,1	1,5
1500	4	15	5,3	5,5	4,4

Fuente: Elaboración propia

Referencias

- [1] Bond, F.C., The third theory of comminution, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (193), pp. 484-494, 1952
- [2] Castrillón, R.P., González, A.J. and Quispe, E.C., Energy efficiency improvement in the cement industry by wet process through integral energy management system implementation. DYNA, [Online]. 80 (177), pp 115-123, 2013. Available at: <http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/177/articulos/v80n177a14/v80n177a14.pdf>

- [3] Coello-Velázquez, A.L., Sovershenstvovanie tehnologii izmilchenii lateritobij pud na zabode "Punta Gorda", PhD Thesis, IMS, Saint Petersburg, 1993.
- [4] Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M., Brown, R., and Rodríguez, B.A., Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder Technology* 182 (1), pp. 113-115, 2008. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.05.027
- [5] Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M., Hechavarría-Pérez J.R. and Rodríguez, B.A., Toward determining the behavior during the impact crushing of minerals. *Minerals and Metallurgical Processing*, 28 (2), pp. 82-87, 2011.
- [6] Da Cunha, E.R., de Carvalho, R.M. and Tavares, L.M., Simulation of solids flow and energy transfer in a vertical shaft impact crusher using DEM, *Minerals Engineering* (43-44), pp. 85-90, 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.09.003
- [7] Deniz, V., A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill, *Cement and Concrete Research* (33), pp. 439-445, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00976-6
- [8] Hechavarría, J.R., Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M. and Laborde-Brown, R., Aplicación de los modelos de Nikolov en la trituración por impacto del mineral zeolita del yacimiento San Andrés, *Holguín, Revista Minería y Geología*, [Online]. 24 (4), pp. 1-17, 2008. Available at: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/70>
- [9] Hukki, R.T., Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond, *Transactions of the AIME* (223), pp. 403-408, 1962.
- [10] Menéndez-Aguado, J.M., Coello-Velázquez, A.L., Tijonov, O.N. and Rodríguez, M., Implementation of the energy sustainable concept during the comminution process of the Punta Gorda Nickel Plant, *Power Technology* (170), pp. 153-157, 2006. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.09.004
- [11] Menendez-Aguado, J.M., Dzioba, B.R. and Coello-Velázquez, A.L., Determination of work index in a common laboratory mill, *Minerals and Metallurgical Processing* 2 (3), pp. 173-176, 2005.
- [12] Morrell, S., An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing* (74), pp. 133-141, 2003. DOI: 10.1016/j.minpro.2003.10.002
- [13] Mosher, J.B. and Tague C.B., Conduct and precision of bond grindability testing, *Minerals Engineering*, 14 (10), pp. 1187-1197, 2001. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00136-4
- [14] Osorio, A.M., Menéndez-Aguado, J.M., Bustamante, O. and Restrepo, G.M., Fine grinding size distribution analysis using the Swrebec function, *Powder Technology* (258), pp. 206-208. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.036
- [15] Palacios, L., Natural resources sustainability: Iron ore mining. *DYNA*, [Online]. 78 (170), pp 227-234, 2011. Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/29507/48796>
- [16] Rodríguez, B.A., Menéndez-Aguado, J.M., Coello-Velázquez, A. and Dzioba, B.R., Transient state analysis by simulation in a closed grinding circuit. *Minerals Engineering* 24 (5), pp.473-475, 2006. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.12.005
- [17] Sadrai, S., Meecha, J.A., Ghomshei, M., Sassani F. and Tromans, D., Influence of impact velocity on fragmentation and the energy efficiency of comminution. *International Journal of Impact Engineering* (33), pp. 723-734, 2006. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.063
- [18] Shi, F. and Kojovic, T., Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. *International Journal of Mineral Processing* (82), pp. 156-163, 2007. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.006
- [19] Shi, F., Kojovic, T., Esterle, J.S. and Davida, D., An energy-based model for swing hammer mills, *International Journal of Mineral Processing* (71), pp. 147-166, 2003. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00035-8
- [20] Taggart, A., *Handbook of Mineral Dressing*, Wiley, 1950
- J.R. Hechavarría-Pérez**, received the BSc. Eng. in Mechanical Engineering, MSc. in Mineral Processing and PhD. in Minerals Engineering in the University of Moa, Moa, Cuba. Currently, he is an associate professor in the Faculty of Engineering in the University of Holguín, Holguín, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6698-9419>
- A.L. Coello-Velázquez**, received the BSc. and MSc in Mining Engineering in the Donetsk National University, and PhD in Minerals Engineering in the Mining Institute of Saint Petersburg, in 1993. Currently he is a full professor in the University of Moa, Moa, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9237-7512>
- F.D. Robles-Proenza**, received the BSc., MSc. and PhD in Mechanical Engineering in the University of Holguín, Holguín, Cuba. Currently he is a full professor in the Faculty of Engineering of the University of Holguín, Holguín, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8995-0771>
- J.M. Menendez-Aguado**, received the BSc. MSc and PhD in Mining Engineering in the University of Oviedo, Oviedo, Spain. Currently he is associate professor in the Polytechnic School of Mieres, University of Oviedo, Spain. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6216-6984>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeom_in_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68