

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN MINERAL DE ALIMENTACIÓN VS EFICIENCIA DE UNA EMPRESA NIQUELÍFERA CON PROCESO CARON

MSc. Ramón Eddie Peña-Abreu¹, rpena@cil.moa.minbas.cu, Lic. Andys Marcos Ramírez-Aberasturis¹, Ing. Leonel García-Olivero¹, Ing. Gerardo Menes-Vueltas^{II}

¹Centro de Investigaciones del Níquel, ^{II}Empresa Comandante Ernesto Guevara de la Serna

Durante un año de operaciones mineras e industriales en el que se presentaron inestabilidades en ambos eslabones del proceso, en una planta niquelífera con tecnología Caron, sucedieron problemas con la eficiencia, no se conocía con claridad los orígenes de tal situación y se dudaba de la calidad de los materiales alimentados, se estimaba que la introducción de minerales atípicos fuesen la causa del problema; por lo que se hizo necesario evaluar el comportamiento metalúrgico y su relación con la alimentación de la materia prima procedente de los diferentes yacimientos en explotación. Se planteó como objetivo la evaluación de la influencia que sobre el comportamiento del proceso metalúrgico ejercieron los minerales alimentados. La estadística multivariada fue la herramienta que permitió validar los comportamientos, con ella se determinó que las malas operaciones fueron la causa fundamental de la ineficiencia. Se obtuvo la distribución de probabilidad en cada una de las variables, lo que permitió conocer la naturaleza de los procesos de alimentación y la correspondencia con las salidas.

Palabras clave: análisis de procesos, componentes principales, clasificación.

During a year of mining and industrial operations in which instabilities occurred in both links of the process, at a nickel plant with Caron technology; efficiency problems occurred, the origin of this situation was not known clearly and there were doubts about the quality materials supplied, it was estimated that the introduction of atypical minerals were the cause of the problem so that it became necessary to evaluate the metallurgical performance and its relation to feeding the raw material from different sites in operation. The evaluation of the influence exerted by the fed minerals on the performance of metallurgical process was set as objective. The multi varied statistical study was the tool that allowed us to validate the performances, it was determined that poor operations were the main cause of inefficiency. We obtained the probability distribution in each of the variables; which allowed knowing the nature of the feeding processes and its correspondence with the outputs.

Key words: industrial process analysis, main components, classification.

Introducción

Son muchas las fuentes que originan ineficiencia en las industrias metalúrgicas de procesamiento de minerales. Las fallas y deterioro de los equipos, las malas operaciones, así como las fluctuaciones en la calidad del mineral, pueden ser las fuentes de comportamientos indeseables. Cuando se conocen las causas de las inestabilidades es sencillo tomar una decisión acertada, sin embargo, no siempre es esta la situación en dichas empresas. En la dinámica de la industria ocurren fenómenos transitorios, que en ocasiones aparecen y desaparecen, sin que se conozca el motivo; puede ser por la combinación de diferentes situaciones negativas o por una desconocida /7/. La insufi-

ciencia en el conocimiento de las causas que provocan las anomalías en el proceso constituyó el problema que se enfrentó en la presente investigación.

Durante un año de operaciones se pueden encontrar inestabilidades en todas los eslabones del proceso, que afectan la eficiencia metalúrgica, sin que se puedan definir los orígenes de cada situación; en el período elegido para el estudio se sospechaba que los materiales alimentados habían incorporado minerales atípicos y se desconfiaba de la representatividad en las pruebas metalúrgicas realizadas a uno de los yacimiento incorporados en explotación. Por lo que el objetivo fundamental de la investigación fue la evaluación de la influencia que los minerales alimenta-

dos ejercieron sobre el comportamiento del proceso metalúrgico.

Se expone un estudio retrospectivo del comportamiento industrial, con vistas a definir la procedencia de las ineficiencias que ocurrieron durante el período de un año. Con ello se pretendió establecer el conocimiento del proceso para la toma de decisiones en el futuro.

Se ha supuesto que con la utilización de la estadística multivariada para el procesamiento de la información disponible del proceso, se puede establecer la combinación de situaciones que dieron origen a los períodos de ineficiencia en el año estudiado. Se realizó un estudio total de las variedades de comportamientos industriales y de los minerales alimentados, así como de su influencia en los resultados metalúrgicos; de esta se reveló que el eslabón metalúrgico generó las ineficiencias y no los minerales alimentados.

Fundamentación teórica

El análisis de procesos con técnicas multivariada ha sido utilizado con éxito en diversas ramas de la ingeniería, en /1/ se utiliza en el estudio del comportamiento de las Variedades de Tabaco; en /5/ se implementa para la Clasificación de Kerosinas; en /6/ se determinan las causas de degradación del óxido de níquel, todos han seguido una secuencia que comienza con un Análisis en Componentes Principales (ACP) y luego con el Análisis de Clasificación (AC), propuesta también por varios autores, pero que sintéticamente se expone en /3,4/. Por lo anterior se ha propuesto realizar el análisis de la relación mineral de alimentación vs eficiencia con métodos multivariados utilizando el software Spad, para identificar las variedades de comportamientos y las variables que rigen el proceso.

Materiales y métodos

Los datos utilizados en la investigación fueron la cantidad de mineral alimentado de cada yacimiento, los índices de eficiencia, así como las variables de operación y control industrial, tomadas por fechas y turnos. La captación y preparación de los datos se realizó mediante el uso de las

herramientas de Microsoft Excel; en el procesamiento estadístico se utilizaron dos software, la versión 5.1 del Statgraphics y la versión 5.6 del Spad. Es válido aclarar que los datos fueron elegidos de los períodos de mayor representatividad, aquellos en que hubo estabilidad y otros en que ocurrieron los comportamientos extremos.

En el presente artículo se le denomina variables de entrada a todas aquellas que describen el mineral alimentado así como los parámetros del proceso y variables de salida a las que muestran los resultados después del procesamiento de los minerales. En la base de datos los campos contienen las variables de entrada y salida. Las variables que dependen funcionalmente de otras no participan directamente en el cálculo estadístico y se le denominan variables suplementarias, tal es el caso de los extractables que dependen de la contracción de los elementos de interés, Ni, Co y Fe. A todas las que participan en los cálculos estadísticos las denominaremos variables activas, y son solo a aquellas que son el resultado de las mediciones en el mineral o en el proceso. Las variables suplementarias dependen funcionalmente de las variables activas. Se entenderá por individuo a una muestra que tiene valores en cada una de las variables estudiadas, que se corresponden con los datos de la operación en los turnos de una fecha dada, los cuales se encuentran en un registro de la base de datos.

La búsqueda de regularidades estadísticas en las variables activas se inició con un estudio descriptivo básico y con pruebas de bondad de ajuste para definir el tipo de distribución probabilística de cada una de ellas, lo que indicó en cada comportamiento los parámetros a tener en cuenta durante la interpretación de la información.

Se realizó un estudio multivariado utilizando el software Spad, en una secuencia que comienza con un Análisis en Componentes Principales (ACP) y luego con el Análisis de Clasificación (AC), este último permite identificar las variedades de comportamientos. Esta secuencia de métodos han tenido éxito en estudios similares /1, 7-8/. Se introdujo una tabla de datos con 136 registros y 47 variables.

El *Spad* devuelve un gráfico del ACP que toma la forma de un círculo de radio unitario, en el cual cada variable está representada por un vector. Las más representativas se muestran con una longitud cercana o igual al extremo del círculo y viceversa, las de menor longitud son menos representativas en ese plano factorial. La correlación se lee en el ángulo formado entre los vectores que representan las variables, los ángulos más agudos muestran buenas correlaciones positivas; los llanos o cercanos a este, negativas y los rectos o cercanos a él, muestran independencia. La matriz de correlación se devuelve en ficheros de texto y en formato de M. S. Excel. El gráfico representa el plano factorial que acumula el mayor porcentaje de información.

En el AC, se evalúa la relación entre los individuos utilizando medidas de similitud y disimilitud, utilizando un algoritmo jerárquico y otro mixto, los detalles se exponen en /3/. Los resultados se muestran en un gráfico factorial, los ejes definen las tendencias del comportamiento, representando con puntos los individuos, esto facilita agruparlos por su similitud a simple vista. El resultado de la clasificación se muestra coloreando los puntos de cada clase. En procesos o fenómenos cuyos estados se diferencian nitidamente, es fácil identificar las clases de forma visual. Cuando la cantidad de datos es amplia, como en el presente trabajo, es necesaria la clasificación automática.

El software devuelve: un informe con el aporte de cada individuo a todo el sistema, su representatividad en cada eje factorial y la pertenencia a cada una a las clases; además caracteriza las clases en las variables activas y suplementarias valorando su contribución en la formación de cada clase. La retroalimentación con los datos originales facilita el establecimiento de las tendencias de comportamiento en los ejes factoriales.

El análisis del especialista contribuye a complementar el cálculo del software y a corregir puntos fronterizos entre clases.

Análisis y discusión de los resultados

Análisis estadístico preliminar

En la alimentación al proceso, el Ni, el Fe y el Co muestran un comportamiento que se ajusta a una distribución de Erlang, evidenciando un comportamiento discreto en el período estudiado. La sílice (SiO_2) y el óxido de magnesio (MgO) no mostraron ajuste a ninguna de las distribuciones conocidas, lo que indica la existencia de una mezcla de poblaciones, donde resulta difícil encontrar leyes que relacionen el comportamiento probabilístico de estas variables con las de interés metalúrgico. Es opinión de los autores que esta situación puede estar relacionada con el tratamiento de beneficio que se le realiza a los minerales antes de arribar a la reducción, influenciado por el caótico comportamiento mineralógico del material laterítico, que además está directamente relacionado con la composición granulométrica /9-11/.

Es notable que en las variables de mayor interés para el proceso, las distribuciones, tanto en la entrada como en la salida poseen iguales distribuciones de probabilidad (Ni con Extractable de Ni; Co con Extractable Co y Fe con Fe reducido). Este hecho informa la influencia del mineral que se alimenta, en el comportamiento estadístico de los resultados después de la reducción; muestra además, que el proceso metalúrgico no cambia la naturaleza probabilística de estos elementos en el mineral; esta información puede facilitar una simulación del proceso de reducción.

Tabla 2
Matriz de correlación

	Mineral Seco Alimentado	Extractable Ni	Extractable Co	Ni	Co	Fe	SiO2	MgO	Petróleo en Cámara	Petróleo Aditivo	% Participación Yacimiento I	% Participación Yacimiento III
Mineral Seco Alimentado	1,00											
Extractable Ni	0,44	1,00										
Extractable Co	0,29	0,67	1,00									
Ni	-0,15	-0,25	-0,09	1,00								
Co	-0,19	-0,07	0,19	0,35	1,00							
Fe	0,15	0,53	0,29	-0,15	0,23	1,00						
SiO2	-0,23	-0,37	-0,23	0,11	-0,29	-0,65	1,00					
MgO	-0,34	-0,56	-0,30	0,21	-0,09	-0,70	0,88	1,00				
Petróleo en Cámara	0,65	0,44	0,21	-0,26	-0,46	0,15	-0,08	-0,28	1,00			
Petróleo Aditivo	0,35	0,23	0,07	-0,09	-0,09	0,08	-0,10	-0,20	0,24	1,00		
% Participación Yacimiento I	-0,29	-0,27	-0,03	0,37	0,46	0,07	-0,11	0,14	-0,37	-0,11	1,00	
% Participación Yacimiento III	0,42	0,32	0,11	-0,36	-0,53	-0,03	0,03	-0,25	0,52	0,27	-0,55	1,00

Una situación similar ocurre con la relación: por ciento de participación de los yacimientos vs extractable de níquel, puede deducirse del gráfico y los valores de la tabla 2, que el mineral proveniente del Yacimiento III pudiera influir en el aumento del extractable de Ni y que el Yacimiento I los empeora. Al profundizar en las relaciones de las variables de operación (Activas) y a los índices de eficiencia dados (Variables complementarias), se nota la tendencia positiva de la correlación del petróleo en cámara con el Yacimiento III; por el contrario, muestra una relación negativa con el por ciento de participación del Yacimiento I. Lo anterior explica la diferencia de condiciones a las que fueron sometidos los minerales de

ambos yacimientos. Esta conclusión deja sin valor cualquier interpretación en contra o a favor, de la influencia de los yacimientos en la formación de la eficiencia extractiva; se hace evidente además que los parámetros de operación ejercieron influencia en el comportamiento de dicha eficiencia. Las relaciones se observan de manera evidente en la figura 1, los índices de eficiencia y de operación, se encuentran alineados de forma directa con la participación del Yacimiento III e inverso al Yacimiento I, reafirmando las diferencias de condiciones a las que fueron sometidos los materiales de ambos yacimientos en el proceso durante el período estudiado, siempre favorables durante la alimentación del Yacimiento III.

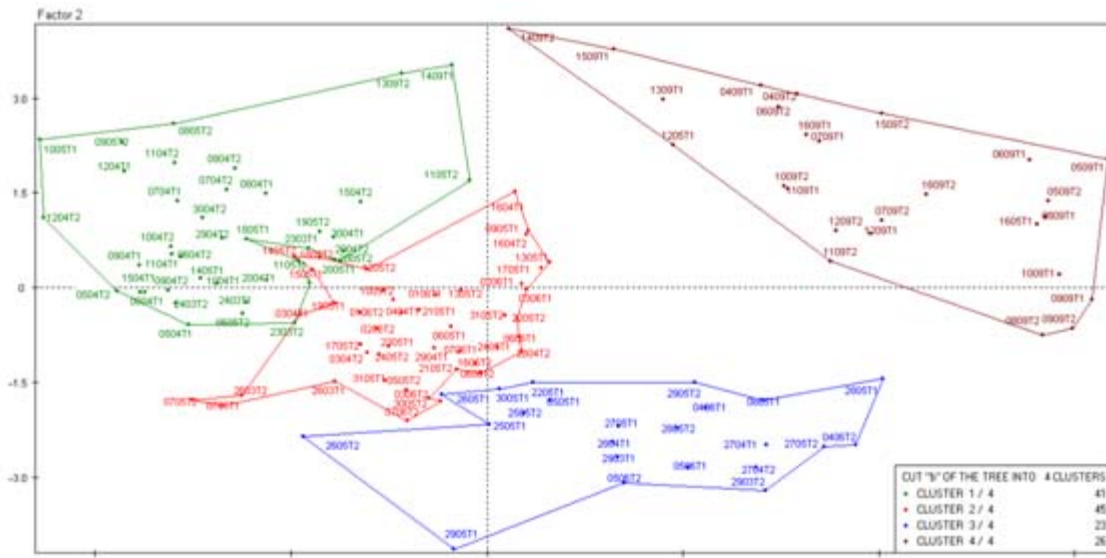


Gráfico 2. de la clasificación en cuatro clases para los datos de la industria.

Clasificación de los comportamientos

Un análisis detallado del comportamiento en el proceso y su relación con los minerales alimentados, se obtuvo con una clasificación no supervisada. En el gráfico 2 se muestran cuatro clases de comportamientos en los turnos de las fechas elegidas, valoradas en las variables más significativas, seleccionadas del análisis en componentes principales (Ni, Fe, Co, MgO, SiO₂, Extractable de Níquel, Extractable de Co, Mineral Seco Alimentado, por ciento de participación de los Yacimientos I y III, Petróleo Aditivo y Petróleo en Cámara).

En la tabla 3 se expone la caracterización de las clases; el comportamiento en las variables de operación y los índices de eficiencia metalúrgica,

así como la participación de los Yacimientos I y III. De ella se corrobora nuevamente la escasa relación entre los extractables con la alimentación de uno u otro yacimiento, por el contrario, se observa la influencia de los parámetros energéticos, fundamentalmente del petróleo aditivo que decrece de clase en clase a partir de la primera, al igual que los extractables. Una relación menos evidente, se ha corroborado con la ayuda del gráfico 1, los mejores valores de las eficiencias y del número de hornos efectivos, estuvo contrapuesto al porcentaje de participación del Yacimiento I y mejor correlacionado con el Yacimiento III, lo que evidencia la diferencia de condiciones en las que fueron procesados los minerales de ambos yacimientos.

de fechas de abril, mayo y junio, la mayoría corresponden con los últimos días de estos meses. La cuarta y última clase presenta el valor más bajo de extractable de níquel, está compuesta por fechas de los primeros 15 d de septiembre y dos fechas de mayo.

El gráfico 2 refleja la posición de cada muestra y de las clases en el plano factorial, de ello se

infiere que los grupos con menores extractables presentan las mayores dispersiones, mientras que el primero y el segundo son los menos dispersos y presentan los mayores extractables; se observa además que los peores comportamientos se encuentran en los últimos días de los meses abril, mayo, junio y en la primera quincena de septiembre.

Tabla 5
Tabla de contingencia: Turno vs clases de comportamientos

%de la Clase en el Turno	Turnos	%de Turnos en la Clase	CLASE 1/4	CLASE 2/4	CLASE 3/4	CLASE 4/4	Todos			
Primer Turno	19	21	14	14	68	27,9	30,9	20,6	20,6	100,0
	46,3	46,7	60,9	53,8	50,4					
Segundo Turno	22	24	9	12	67	32,8	35,8	13,4	17,9	100,0
	53,7	53,3	39,1	46,2	49,6					
Todos	41	45	23	26	135	30,4	33,3	17,0	19,3	100,0
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0					

La tabla 5 muestra la relación turnos de trabajo vs clases, contiene la cantidad de coincidencias y el porcentaje de la clase en el turno y viceversa. Al leer el primer cuadro (primera clase vs primer turno), se identificó que contiene 19 muestras que representan un 46,3 % de la primera clase y el 27,9 % del primer turno. En este contraste se tiene que el 63,7 % de las muestras estudiadas corresponden al primer y el segundo grupo, los de mayores extractables, de ellos un 29,6 % pertenecen al primer turno y un 34 % al segundo. La tercera y cuarta clase se consideran menos favorables en el proceso, lo que previene a los tecnólogos para que ajusten las operaciones hacia las mejores condiciones de eficiencia.

Conclusiones

1. El porcentaje de participación de los minerales de uno u otro yacimiento en la alimentación de la industria no influyó en la eficiencia de extracción en el período estudiado, durante el cual tuvieron mayor incidencia los factores de operación.

2. Se logró establecer las distribuciones probabilísticas de la alimentación de mineral y el comportamiento en las variables de salidas al proceso industrial, lo que permitirá la simulación del proceso en investigaciones futuras. Con ello se infiere que el proceso no afecta la naturaleza probabilística de las principales variables.
3. Se diferenciaron cuatro clases de comportamientos, de altos y bajos extractables. Dos se corresponden con altos valores y contienen la mayoría de las muestras estudiadas y dos con los valores más bajos de este índice.
4. Se lograron diferenciar los períodos en los cuales ocurrieron con mayor frecuencia los bajos extractables. Se diferenció además la correspondencia de los turnos con los mejores y peores resultados

Recomendaciones

1. Profundizar en el estudio de los comportamientos a partir del análisis estadístico de los

resultados en pruebas de banco y su comparación sincronizada con los resultados del proceso industrial.

2. Contrastar las variedades de comportamientos en el mineral con la industria, para establecer criterios de estimación de la eficiencia a partir del procesamiento de muestras a escala de banco.

Bibliografía

1. HERNÁNDEZ M.E. Cristo, Gustavo BELLO C, PINO PÉREZ L. A. “Aplicación del Análisis de Cluster a la Clasificación de Variedades de Tabaco”. COMPUMAT. CD Memorias. ISSN: 1728-6042. 2005.
2. CRIVISQUI E., DROESBEKE. J. J. “Le concept mathématique de distance et la comparaison des éléments d'un tableau de données”. Cultures et Sociétés. (En francés). También en línea, buscar en <http://www.ulb.ac.be/>. 1993. Págs. 17-32.
3. Crivisqui, Eduardo 12/3/2006. “Presentación del Análisis de Clasificación. Página de la asociación PRESTA”, Université Libre de Bruxelles. <http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html>
4. _____. “Presentación del Análisis de Componentes Principales”. Página de la asociación PRESTA, Université Libre de Bruxelles”. <http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html>.
5. MORALES A, Dago. CAVADO OSORIO A, FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ R; LINCHENAT Dennes E. “Desarrollo de un Modelo SIMCA para la Clasificación de Kerosinas Mediante el Empleo de la Espectroscopia Infrarroja”. Química Nova vol. 31 no.6 São Paulo 2008. ISSN 0100-4042. doi: 10.1590/S0100-40422008000600049. En Línea en: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422008000600049&script=sci_arttext. 2008.
6. PEÑA ABREU R. E, SAM PALANCO C. M, MAJENDIÉ CEMITIERE R, RIVERO PIÑA B, LABORÍ LEYVA N. Determinación de las Causas de Degradación del Óxido de Níquel. Diagnóstico Estadístico Multivariado. Tecnología Química Vol. XXVII, No. 1. 2007.
7. PEÑA ABREU R.E, FERNÁNDEZ MARTÍNEZ L. “Estudio del Yacimiento Yagrumaje Sur para la Proyección de un Muestreo Tecnológico a Escala de Banco. Análisis de la Utilidad de la Información Obtenida en Estudios Precedentes”. Reporte Técnico. CEINNIQ. 2009. Pág. 157.
8. PEÑA ABREU R. E, RODRÍGUEZ CARDONA A. HERNÁNDEZ Ramsay A. “Estudio Estadístico Multivariado para la Selección de una Muestra Tecnológica”. CD, Memorias de la I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. ISBN: 959-7117-03-7. 2005.
9. ROJAS PURÓN A.L. “Principales Fases Minerales Portadoras de Níquel en los Horizontes Lateríticos del Yacimiento Moa”, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Geológicas, ISMM, Moa. 1994.
10. _____. “Evidencias a Favor de que la Goethita es la Principal Portadora de Níquel en los Horizontes Lateríticos de las Cortezas Ferroniquelíferas”. Revista Minería y Geología. 21-31. vol. 18. Nº. 3-4. 2001.
11. ROJAS PURÓN A.L, RÓMULO SIMÕES A, OROZCO MELGAR G. “Presencia de Fases de Óxidos de Manganeso en Perfiles Lateríticos de Níquel del Yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba”. MIN2-06. CD de Memorias de la II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana. 2007.