

UN METODO DE PREDICCIÓN DE POTENCIA CRÍTICA EN MOLINOS SEMIAUTOGENOS, BASADO EN MODELOS DE HAMMERSTEIN

A. Cipriano* E. Gómez* C. Bustos* G. González**

* Depto. de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 6177, Santiago, CHILE

** Depto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile
Casilla 5037, Santiago, CHILE

Resumen

El objetivo principal de una planta de molienda semiautógena es maximizar el mineral procesado, utilizando la máxima potencia disponible. Sin embargo, para evitar una sobrecarga del molino también es necesario asegurar que opere en una zona estable, para lo cual la potencia no debe superar un valor máximo, denominado potencia crítica. En este trabajo se presenta un método que proporciona una predicción continua de esta potencia crítica. El método hace uso de un modelo dinámico de Hammerstein para relacionar potencia y mineral fresco alimentado al molino.

Abstract

A wellknown goal for a semiautogenous grinding plant is to maximize mill throughput by using maximum available power draught. To prevent overloading in the mill is however also necessary to maintain the mill operation in the stable zone. Then, the critical value of the power draught must not be exceeded. A method to predict continuously this critical power is presented in this paper. It is based on a dynamical Hammerstein model of the mill. The model relates actual power draught with fresh ore feed rate.

Keywords: Mineral semiautogenous grinding; Optimal operation; Critical power prediction; Hammerstein model; Parameter estimation.

1. INTRODUCCION

Las técnicas convencionales de molienda (bolas y barras) se aplican industrialmente desde hace años y con bastante éxito en diversas plantas de procesamiento de minerales. Los elevados costos de inversión y operación que involucran han llevado, sin embargo, a la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas. Entre éstas, la molienda semiautógena se ha extendido rápidamente debido, principalmente, a que permite reducir los costos de capital y de operación (Barahona, 1984).

Desde el punto de vista del control automático, un molino semiautógeno presenta condiciones de operación fuertemente dependientes de las características del mineral de alimentación, en especial de la granulometría y de la dureza del mineral. Un cambio en una de estas características constituye una perturbación importante del proceso. Para hacer frente a estas perturbaciones se acostumbra a controlar la potencia eléctrica demandada manipulando la alimentación de mineral. Debido a las no linealidades y los retardos involucrados, el control de la potencia no es simple, lo cual ha llevado a experimentar con diversas estrategias de control estabilizante, entre ellas algunas basadas en técnicas adaptivas.

Una operación óptima del molino requiere, sin embargo, de un supervisor que fije la referencia apropiada al controlador de potencia. En efecto, en un molino semiautógeno operando con control automático de potencia, una reducción del tamaño de las partículas en la alimentación originará una reducción de potencia y, como consecuencia, y de mantenerse fija la referencia del controlador, un aumento del mineral de alimentación que tenderá a contrarrestar el efecto de la granulometría.

Si la reducción de tamaño continúa, comenzará a aumentar la cantidad de mineral acumulado en el molino, pudiendo ocurrir que el volumen de pulpa en su interior alcance el valor máximo permitido para las condiciones de operación existentes. Al alcanzarse este valor crítico, la potencia comenzará a disminuir si sigue incrementándose el mineral fresco de alimentación y la operación se tornará inestable.

Para la detección de estas situaciones críticas se han desarrollado técnicas basadas en el análisis de tendencia de las variables relevantes, específicamente la potencia demandada y la presión en los descansos del molino (Jeréz, 1985). Este método, si bien incrementa la disponibilidad de la estrategia de control, no entrega la potencia crítica. De conocerse esta potencia crítica, aún de manera aproximada, sería posible fijar una referencia de potencia en un valor cercano al máximo, de forma que se opere aún en condiciones seguras, pero maximizando el mineral procesado.

Otros métodos de estimación y predicción en plantas de molienda semiautógena, como el desarrollado por Herbst (1983), no incluyen la potencia crítica entre las variables que proporcionan. El método de González (1987b), por su parte, requiere la medición de los flujos de agua y mineral en la alimentación y en la descarga del molino, variables, estas últimas, que normalmente no se encuentran instrumentadas.

En este trabajo se estudian y se aplican técnicas de modelación adaptiva a la predicción del comportamiento de la potencia crítica. El estudio se basa en la utilización de modelos dinámicos no lineales del tipo Hammerstein, los que se ajustan a las mediciones de potencia y flujo de mineral.

La validación del método se realiza primero por simulación, considerando el modelo de molino semiautógeno descrito en González (1987a), y luego con datos de una planta de molinera semiautógena en operación.

2. MODELO DE HAMMERSTEIN PARA LA POTENCIA

2.1 Modelación de procesos no lineales

Una caracterización empírica de las relaciones entre variables de entrada y de salida de procesos complejos, como es el caso de un molino semiautógeno, puede realizarse recurriendo al modelo general de Hammerstein, definido por la ecuación de diferencias (Lachmann, 1982)

$$A(q^{-1})J(t) = s + B_1(q^{-1})U(t-d) + B_2(q^{-1})U^2(t-d) + \dots + B_p(q^{-1})U^p(t-d) \quad (1)$$

En esta expresión q^{-1} indica el operador de desplazamiento en el tiempo discreto t , $J(t)$ y $U(t)$ corresponden a los valores de la salida y de la entrada (por ejemplo, la potencia y el flujo de mineral en un molino semiautógeno), d es el retardo, s es un coeficiente y p es el grado del término no lineal en el control. Por su parte, $A(q^{-1})$ y los polinomios $B_i(q^{-1})$ corresponden a:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_m q^{-m} \quad (2)$$

$$B_j(q^{-1}) = b_{1j} q^{-1} + b_{2j} q^{-2} + \dots + b_{mj} q^{-m} \quad (3)$$

Los parámetros de estos modelos (los coeficientes s , a_j y b_{ij}) se actualizan empleando el algoritmo de estimación de mínimos cuadrados extendido convencional (Isermann, 1981), derivado de la minimización de un índice del error instantáneo de ajuste $e(t)$ dado por

$$e(t) = J(t) - \phi^t(t) \underline{\theta} \quad (4)$$

En esta última expresión, $\underline{\theta}$ designa al vector de parámetros

$$\underline{\theta} = [s \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m \ b_{11} \ b_{21} \ \dots \ b_{m1} \ \dots \ b_{mp}]$$

y ϕ al vector de datos correspondiente, incluyendo las salidas $J(t-1), \dots, J(t-m)$, y las entradas $U(t-d-1), \dots, U(t-d-m)$, así como sus potencias de orden 2, 3, ..., p .

Un modelo dinámico como el presentado permite caracterizar también el comportamiento estático del proceso. En efecto, si se asume que los parámetros del modelo tienden a permanecer constantes, el modelo dinámico dará origen en estado de régimen a la ecuación (Bamberger e Isermann, 1978)

$$J = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 U^2 + \dots + \beta_p U^p \quad (5)$$

con

$$\alpha = s / A(1)$$

$$\beta_i = B_i(1) / A(1)$$

siendo J y U los valores de la potencia y del flujo de mineral en estado de régimen.

De esta forma se obtiene una ecuación polinomial de grado p en el control, en la cual los parámetros s , a_j , b_{ij} corresponden a los estimados, por ejemplo, mediante el algoritmo recursivo de mínimos cuadrados.

2.2 Ajuste del modelo para pruebas simuladas

Con el objetivo de validar el modelo de Hammerstein formulado para la potencia, se realizaron inicialmente pruebas consistentes en simular un modelo del molino semiautógeno basado en ecuaciones de balance másico y ecuaciones de descarga para los flujos de agua y mineral, que consideran el comportamiento no lineal de la potencia con respecto al inventario de mineral (González, 1987a). En estas pruebas se supuso además una razón agua-mineral de alimentación constante, lo cual corresponde a un control indirecto de la densidad de pulpa en el molino.

El análisis se realizó para los diferentes puntos de operación mostrados en la curva estática potencia-tonelaje de la figura 1 y en la tabla 1; en esta se indica el valor medio del flujo de mineral de alimentación y de la potencia demandada para el estado de régimen correspondiente, supuesto que las restantes variables de entrada no cambian.

Tabla 1: Puntos de operación

	U	J
Nº 1	0.50	0.692
Nº 2	0.80	0.917
Nº 3	1.00	0.987
Nº 4	1.12	1.000

Obsérvese que el punto de operación Nº 4 corresponde al punto crítico, esto es, de máxima potencia.

Para la realización de cada prueba por simulación se ajustó, primero, el flujo de alimentación al valor correspondiente al punto de operación y luego se procedió a superponer, como perturbación, un ruido blanco de perturbación de varianza cercana al 18% del valor continuo correspondiente al punto crítico, lo cual representa un caso de perturbación extrema.

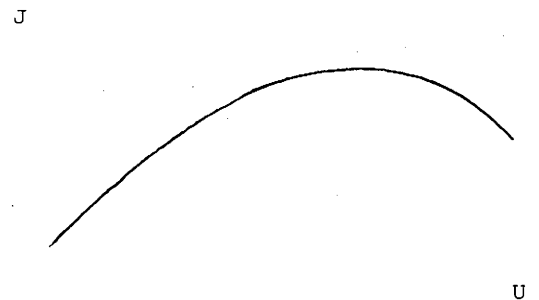


Figura 1: Característica estática potencia J-tonelaje U.

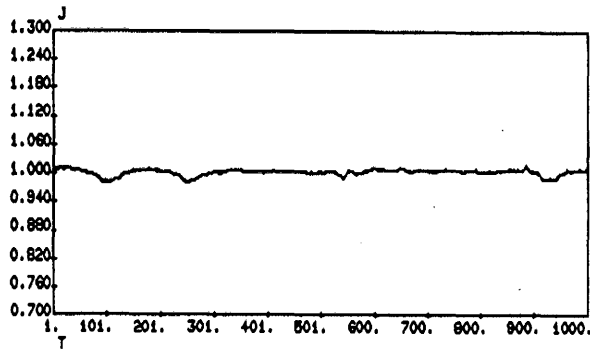


Figura 2 : Potencia demandada vs. tiempo.

Llevando a cabo un análisis exhaustivo de estimación de modelos lineales ($p=1$) se determinó que un modelo de tercer orden ($m=3$) proporciona un buen ajuste. La convergencia de parámetros en estos casos no mejora sustancialmente para modelos de orden superior.

A continuación se realizó el ajuste de un modelo de Hammerstein cuadrático de tercer orden, dado por

$$J(t) + a_1 J(t-1) + a_2 J(t-2) + a_3 J(t-3) = s + b_1 U(t-d-1) + b_2 U(t-d-2) + b_3 U(t-d-3) + c_1 U^2(t-d-1) + c_2 U^2(t-d-2) + c_3 U^2(t-d-3) \quad (6)$$

En la tabla 2 se presentan el promedio μ_e y la desviación estándar σ_e del error de ajuste, obtenidos para cada uno de los casos. Se aprecia un buen ajuste en todos los casos, destacándose que el error mínimo, tanto en promedio como en desviación estándar, se obtiene para el punto crítico (punto de operación N° 4).

Tabla 2: Estadísticas de ajuste del modelo cuadrático.

	μ_e	σ_e
Nº 1	-3.919 E-5	6.351 E-3
Nº 2	-2.844 E-5	5.287 E-3
Nº 3	-7.285 E-6	2.589 E-3
Nº 4	4.858 E-6	7.118 E-4

2.3 Ajuste del modelo con datos reales

El modelo se ajustó para los registros de tonelaje y potencia mostrados en las figuras 2 y 3, obtenidos cada 1 minuto en una planta de molienda semiautógena bajo control PID de potencia.

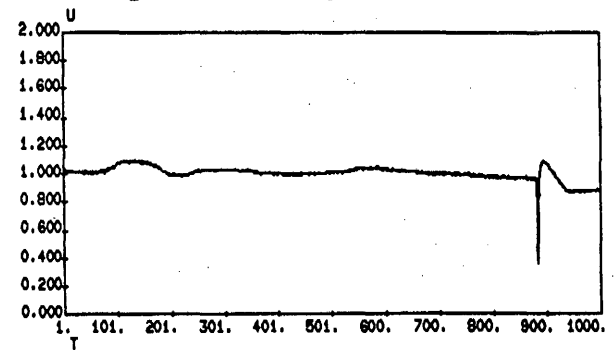


Figura 3 : Tonelaje de alimentación vs. tiempo.

Al ajustar el modelo (6) se obtuvo mínima desviación estándar del error para un retardo $d=10$. Los valores del promedio y de la desviación estándar del error de ajuste son en este caso

$$\mu_e = 5.410 E-5 \quad \sigma_e = 9.662 E-4$$

Las figuras 4 a 7 muestran una convergencia suave de los parámetros estimados, lo cual es una condición importante para asegurar la validez del modelo estático derivado del modelo dinámico.

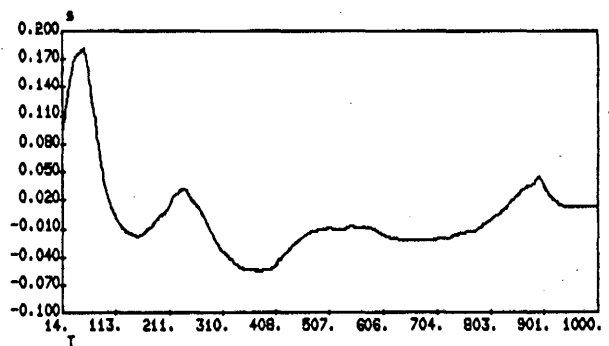


Figura 4 : Parámetro s vs. tiempo.

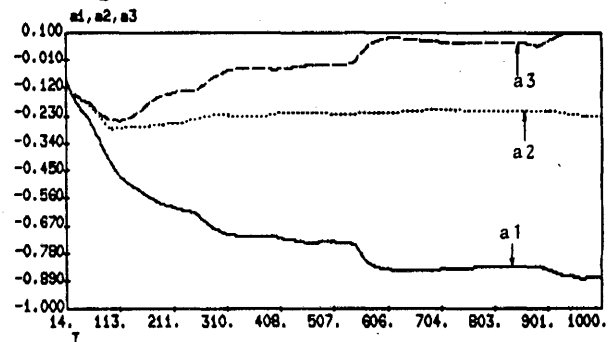


Figura 5 : Parámetros a_1 a_2 a_3 vs. tiempo.

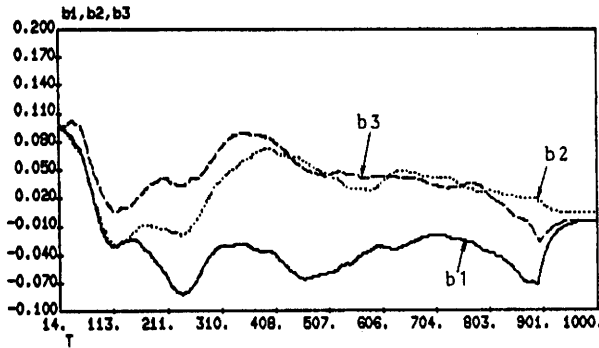


Figura 6: Parámetros b₁ b₂ b₃ vs. tiempo.

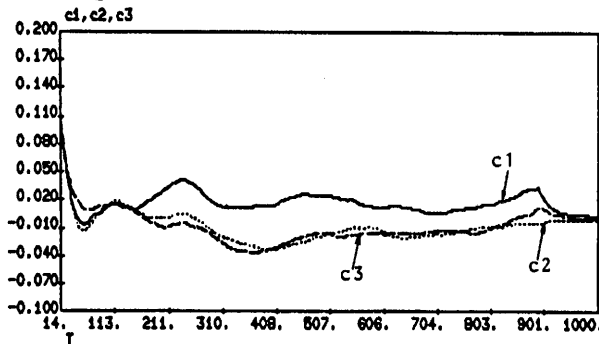


Figura 7: Parámetros c₁ c₂ c₃ vs. tiempo.

3. PREDICCIÓN DE POTENCIA CRÍTICA

3.1 Método de determinación de la potencia crítica

La figura 1 muestra una característica estática típica de la relación potencia-tonelaje en un molino semiautógeno. En torno a un punto de operación dicha relación puede aproximarse por una expresión cuadrática de la forma

$$J = \alpha + \beta_1 U + \beta_2 U^2 \quad (7)$$

derivada del modelo dinámico de Hammerstein (6). La relación (7) dará origen a un máximo de potencia para el tonelaje crítico

$$U^* = -0.5 \beta_1 / \beta_2 \quad (8)$$

siempre que $\beta_2 < 0$.

Reemplazando el valor del tonelaje crítico en la expresión para J se obtiene la potencia crítica J*:

$$J^* = \alpha + \beta_1 U^* + \beta_2 (U^*)^2 \quad (9)$$

Si los parámetros del modelo se ajustan, por ejemplo, cada 1 minuto, el método propuesto actualizará también cada 1 minuto la predicción de la potencia crítica. La información así proporcionada a los operadores de una planta de molinera

semiautógena constituye una eficaz ayuda para que la referencia del controlador de potencia se mantenga en su valor óptimo.

3.2 Pruebas por simulación

La tabla 3 resume los resultados obtenidos por simulación al aplicar el método propuesto bajo las condiciones definidas en 2.2. En la tabla se incluye el promedio de las señales entregadas por el simulador (potencia J y tonelaje U) y por el algoritmo de predicción (potencia crítica J* y tonelaje crítico U*) a partir del instante 200 y hasta el final de la prueba, para los distintos puntos de operación. La potencia crítica supuesta es constante y dada por $J_{max} = 1$.

Tabla 3: Promedios de potencia y tonelaje

	U	U*	J	J*
Nº 1	0.500	0.576	0.692	0.706
Nº 2	0.800	0.919	0.917	0.928
Nº 3	1.000	1.141	0.987	0.993
Nº 4	1.120	1.019	0.999	0.999

Especial atención merecen los resultados correspondientes al punto Nº4, para el que la predicción de potencia crítica es exacta, aún cuando la determinación del tonelaje crítico presente error. Se deduce también de la tabla 3 que mientras más se aproxime la potencia de operación a la crítica, mejor será la predicción.

Las figuras 8 y 9 muestran la evolución en el tiempo de las señales de potencia y tonelaje (J, U), de potencia crítica y tonelaje crítico estimados (J*, U*) y, para propósitos de comparación, la potencia y el tonelaje máximos del modelo simulado (J_{max} , U_{max}), para el punto de operación Nº 2. De ellas se han excluido los 200 instantes iniciales por entregar variaciones excesivas de las variables estimadas. En las figuras se aprecia concordancia con lo esperado: la potencia crítica se mantiene levemente sobre el promedio, pero bajo la potencia máxima en las zonas de operación estable.

Un estudio de simulación más severo consiste en predecir la potencia crítica y el tonelaje crítico considerando una alimentación de mineral cuyo valor medio varía en el tiempo. El agua fresca de alimentación, por su parte, se mantiene fija. Para hacer la prueba más realista, se considera que la media del flujo de mineral se incrementa en forma de una rampa, partiendo de $U=0.95$, y alcanzando el valor crítico $U=1.12$. El ruido blanco que se superpone a la señal presenta una desviación estándar igual a 0.04.

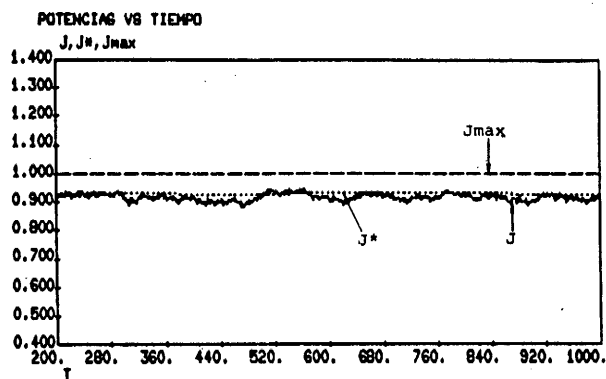


Figura 8 : Potencia y potencia crítica vs. tiempo

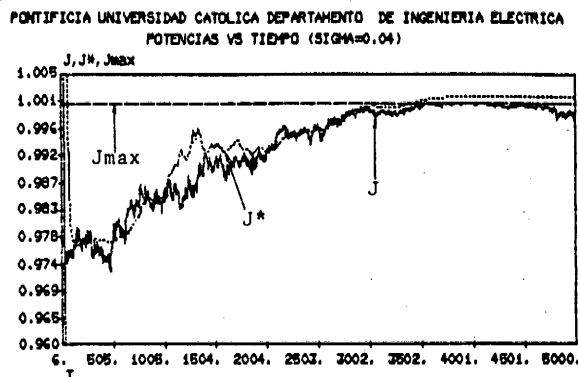


Figura 10 : Potencia y potencia crítica vs. tiempo.

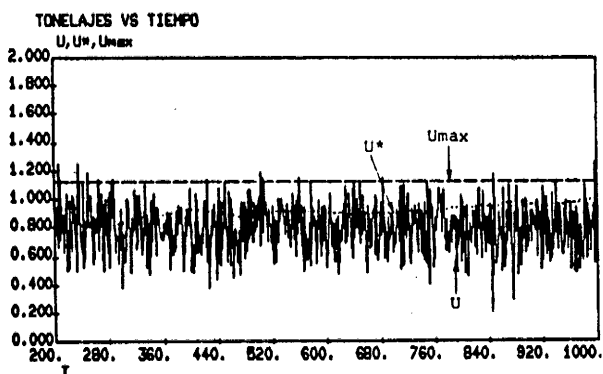


Figura 9 : Tonelaje y tonelaje crítico vs. tiempo

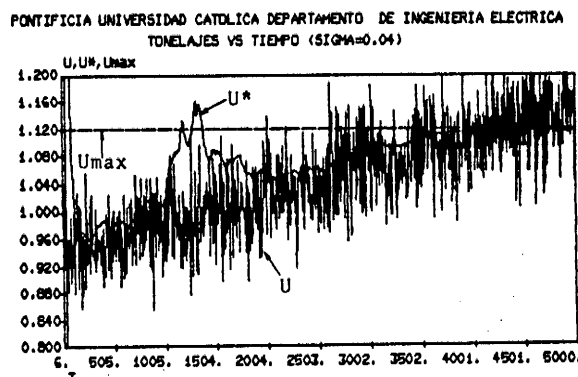


Figura 11 : Tonelaje y tonelaje crítico vs. tiempo.

Las figuras 10 y 11 muestran la variación en el tiempo de la potencia y del tonelaje, y de las predicciones de potencia crítica y tonelaje crítico, junto a los valores máximos generados por la simulación. De las figuras se confirma que las estimaciones se acercan a los valores críticos, a medida que el tonelaje crece. En particular se aprecia que entre los instantes 3000 y 3700 el error de estimación de la potencia máxima es inferior al uno por mil. Cabe destacar al respecto que el ruido contenido en la señal de tonelaje tiene una fuerte influencia sobre la estimación, obteniéndose excelentes resultados para una desviación estándar del ruido en el rango 2 a 3% (Gómez, 1987).

3.3 Prueba del método con datos reales

Utilizando el procedimiento descrito y los datos de operación mencionados en 2.3, se obtuvieron los siguientes resultados para el promedio de las señales reales y de las señales críticas predichas, en el intervalo comprendido entre los instantes 300 y 750:

Potencia J = 1.005
 Potencia crítica J* = 1.075
 Tonelaje U = 1.011
 Tonelaje crítico U* = 1.226

La evolución en el tiempo de las predicciones de los valores críticos de potencia y tonelaje, en conjunto con las señales reales, se presentan en las figuras 12 y 13, respectivamente.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
 POTENCIAS VS TIEMPO

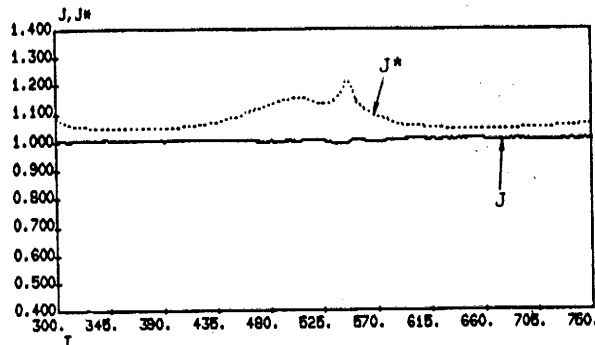


Figura 12 : Potencia y potencia crítica vs. tiempo.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
 TONELAJES VS TIEMPO

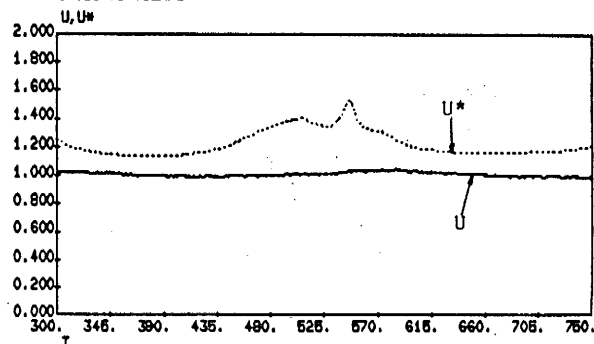


Figura 13 : Tonelaje y tonelaje crítico vs. tiempo.

Obsérvese que bajo estas condiciones de operación se obtienen predicciones cercanas al 7% y al 21% sobre el promedio de potencia real y flujo de mineral real, respectivamente. Mientras la potencia crítica predicha parece encontrarse en el rango de lo admisible, la predicción del tonelaje crítico se encuentra claramente sobre lo esperado en una planta que lleva ya algunos años en operación.

4. COMENTARIOS FINALES

Los resultados obtenidos en la predicción de la potencia crítica y del tonelaje crítico, por simulación y para datos reales, a partir del ajuste de un modelo dinámico no lineal tipo Hammerstein, han sido promisorios. El estudio de simulación ha considerado un modelo cualitativo en el que existe una relación de tipo cuadrático entre la potencia y el inventario de mineral, dependencia que aún no ha sido totalmente clarificada por los expertos. Esto constituye un factor importante a tener en cuenta al utilizar el método en un ambiente industrial.

Por otro lado, las predicciones de potencia crítica con datos simulados no fueron siempre precisas, lo cual sugiere analizar alternativas para los modelos dinámicos, por ejemplo incluyendo productos entre la potencia y el tonelaje (Billings, 1982). También presenta interés validar por simulación el método en casos en que el proceso se encuentre bajo control de potencia, por ejemplo con control PID. La estructura de los modelos aplicables en estos casos constituye un tema que merece ser explorado en investigaciones futuras.

5. REFERENCIAS

Barahona, C. (1984). Modeling and simulation of semi-autogenous grinding systems. M.Sc. Thesis in Mineral Processing and Operations Research, Pennsylvania State University.

Billings, S. A. & Leontaritis, I. J. (1982). "Parameter estimation techniques for nonlinear systems". Proc. of the IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Virginia, Vol. 1: 427-432.

Gómez, R. E. (1987). Estimación y Predicción de variables en procesos dinámicos complejos con aplicación a planta de molienda semiautógena. Tesis de Magister, Depto. de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

González, G. & Cipriano, A. (1987a). Estimación y predicción de variables en plantas de molienda. Informe Final Proyecto CONSAG, Fondo de Desarrollo Productivo de la CORFO.

González, G. & Cipriano, A. (1987b). "On line estimation of maximum power draught in semiautogenous mills". Proc. of the 10th. IFAC World Congress, Munich, Vol. 2: 154-159.

Herbst, J. A. & Pate, W. T. & Vanderbeek, J. L. (1983). "Real-time estimation of unmeasured variables in a semiautogenous grinding circuit". Fall SME-AIME Meeting, Salt Lake City, Utah.

Isermann, R. (1981). Digital Control Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Jeréz, J. & Toro, H. & von Borries, G. (1985). "Automatic Control of Semi-Autogenous Grinding at Los Bronces". Proc. of the IFAC Symposium on Automation for Mineral Resource Development, Brisbane: 275-282.

Lachmann, K.H. (1982). "Parameter-adaptive control of a class of nonlinear processes". Proc. of the IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Virginia, Vol. 1: 372-374.