

## Optimización de circuitos de molienda húmeda de suspensiones poliminerale: retos en el análisis de variables, simulación y control de procesos

### Optimization of circuits of humid grinding of polymineral suspensions: challenges in the analysis of variables, simulation and process control

Lina María Chica Osorio<sup>1</sup>, Manuel Alejandro Ospina Alarcón<sup>2</sup>, Oswaldo Bustamante Rúa<sup>3</sup>

1,2. Investigador IM. Cimex. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Cr 65 N.63-20 Bloque 54. lmchica@unalmed.edu.co

3. Profesor asociado Escuela de materiales Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. mobustam@unalmed.edu.co

Recibido 4/10/09, Aceptado 28/11/09,

#### RESUMEN

El presente artículo pretende la optimización de un circuito molienda-clasificación húmeda de suspensiones poliminerale evaluando el impacto de cambios en parámetros de operación sobre la respuesta dinámica del circuito para predecir las principales perturbaciones que pueden generar la inestabilidad del proceso. Para ello se llevó a cabo un trabajo de investigación experimental en un circuito industrial compuesto por un molino de bolas y un clasificador tipo hidrociclón operando con suspensiones poliminerale caolín/arena. Los resultados de este estudio experimental permiten concluir que la distribución de tamaños de partícula y la relación composicional entre minerales del alimento al molino así como la fracción volumétrica de sólidos a la entrada del hidrociclón, son las variables críticas del proceso, puesto que tienen un mayor impacto sobre las características del producto final del circuito. Este artículo muestra el reto que existe al evaluar circuitos que operan con suspensiones formadas por más de un mineral en cuanto al análisis de variables, simulación y control del proceso, y resaltar su importancia dentro del procesamiento de minerales en la industria minera nacional.

**Palabras clave:** Control, circuitos molienda-clasificación, suspensiones poliminerale

#### ABSTRACT

This paper presents the optimization of wet grinding-classification circuit for polyminerals suspensions and the impact evaluation of operating parameters changes on dynamic response of circuit. The experimental work was carried out on industrial close circuit with a ball mill and hydrocyclone classifier operating with polyminerals clay/silica suspensions. The results show that particle size distribution, solid volume fraction and feed composition are the critical parameters for this process, because they have a greater impact on final product characteristics. This article shows the challenge on circuits evaluation wich operate with polyminerals suspensions and their importance in the minerals processing industry.

**Key words:** Control, grinding-classification circuits, polyminerals suspensions

#### NOMENCLATURA

cc: Cortocircuito de finos  
C(x): Función clasificación  
 $d_{50}$ : diámetro de corte  
DTP: Distribución tamaño de partícula  
 $F_f$ : tasa de alimento de mineral al molino  
 $H_m$ : % Humedad rebalse

K/A: Razón Kaolín/Arena  
Sp: DTP rebalse  
SI: Índice de claridad  
 $W_d$ : la tasa de agua a la salida del molino  $\Phi_v$ : Fracción volumétrica de sólidos  
 $\mu$ : Viscosidad

## 1. Introducción

Una de las operaciones más importantes en el procesamiento de minerales es la reducción de tamaño de las materias primas. Este proceso, generalmente se realiza en un circuito cerrado compuesto por un molino de bolas y un clasificador tipo hidrociclón. La molienda es un proceso difícil de controlar debido al alto grado de interacción entre las variables del proceso y sus características dinámicas complejas: la existencia de grandes retardos, parámetros variables con el tiempo, no linealidades y severas interacciones entre los lazos de control, los cuales pueden causar efectos indeseables en el desempeño del proceso. Si bien es cierto que existen modelos simples basados en el control por agrupamiento de pares de variables controladas como la distribución de tamaño de partícula, la carga circulante y la tasa de alimentación al hidrociclón, estos modelos se han desarrollado en suspensiones formadas por un solo mineral. Sin embargo como es de esperarse la respuesta de una suspensión monomineral al proceso molienda-clasificación difiere de la respuesta de suspensiones formadas mezclas de minerales. De otro lado, la clasificación como proceso que además de determinar la DTP del producto controla la carga circulante del circuito es aún más compleja de controlar debido a la presencia de esta mezcla de minerales que poseen diferencias en sus características químicas y morfológicas, y por lo tanto exhiben un comportamiento dinámico también diferente lo cual genera un incremento de variabilidad operacional, lo que conlleva a la generación de una mayor cantidad de partículas finas producto de la remolienda. Este panorama indica los retos existentes en el análisis de las variables determinantes en la operación de circuitos húmedos de molienda-clasificación cuando se opera con suspensiones poliminerales como las que actualmente se utilizan en la industria minera nacional, y el control automático se abre paso como una herramienta crucial en la optimización de dichos procesos.

## 2. Desarrollo experimental

Las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento de un circuito de molienda húmeda operando con suspensiones poliminerales, se llevaron a cabo en un circuito industrial como el mostrado en la Figura 1. Dicho circuito está conformado básicamente un molino de bolas Allis Chalmers, un hidrociclón de 10 pulgadas de diámetro, un tanque acondicionador y una bomba de sólidos.

Los parámetros controlados en planta dentro del circuito de molienda son el porcentaje de agua en el rebalse del hidrociclón que debe permanecer en un rango entre 83 - 87% y el porcentaje retenido en malla 325 serie Tyler también del rebalse que debe oscilar entre 10 - 20 %.

### 2.1 Material de prueba

Se emplearon suspensiones formadas por diferentes proporciones caolín/arena, ambos minerales extraídos del mismo lote. La caracterización dichas suspensiones se resumen en la Tabla 1.

### 2.2 Procedimiento experimental

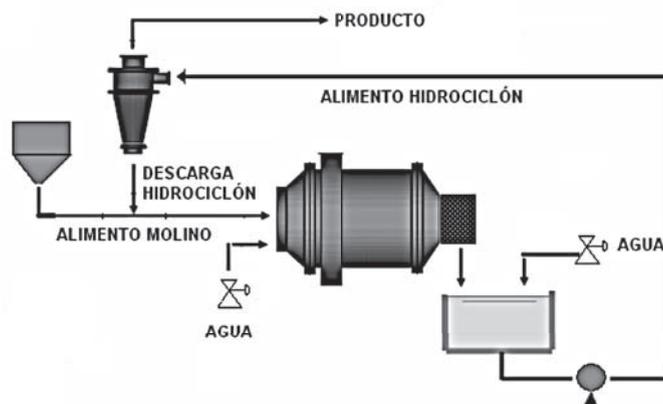
Para propósito de modelamiento del sistema y la evaluación de la operación del hidrociclón, se realizaron pruebas generando cambios positivos y negativos para cada variable controlada (fracción volumétrica de sólidos, presión y mezcla caolín/arena) sobre la referencia de condiciones típicas de operación del circuito evaluado como se observa Tabla 2.

## 3. Presentación y análisis de resultados

### 3.1. Evaluación de la operación del hidrociclón

La operación del hidrociclón y su respuesta ante cambios en variables geométricas y operativas, generalmente se evalúa mediante la función clasificación  $C(x)$  y parámetros derivados de ella:  $SI$ ,  $d_{50}$  y  $cc$ . Sin embargo, este último parámetro que representa la cantidad de partículas finas que llegan a la descarga (típica corriente de gruesos) es crítico dentro de la operación de un circuito de reducción de tamaño si se considera que dichos finos retornan al molino. La Figura 2, muestra el histograma correspondiente a cada corriente del hidrociclón: alimento, rebalse y descarga revelando el comportamiento bimodal de la distribución del tamaño de partícula. Los resultados de ensayos pérdidas por ignición PPI (<325 Mallas: 4.71%; >325 Mallas: 0.1) permiten asociar el primer modo a la fracción arena, y el segundo modo a la fracción de arcilla caolinítica.

Figura 1. Esquema circuito de molienda.



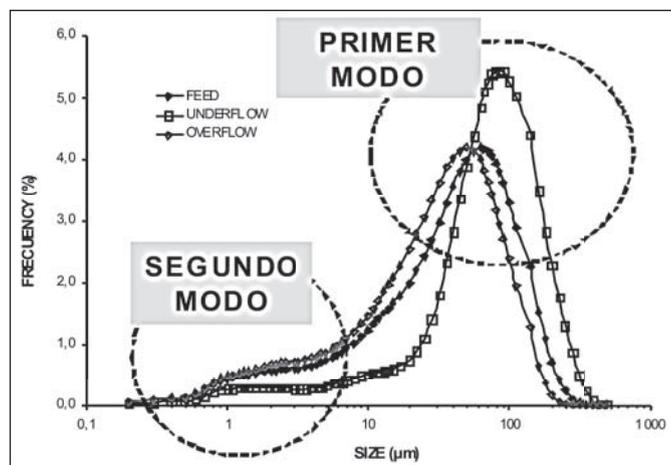
**Tabla 1.** Caracterización alimento

Kaolin (%)	H <sub>m</sub> (%)	Densidad (g/l)	Viscosidad μ (cp)	□ <sub>v</sub>
0	83,75	1145	10,20	6,82
30	81,33	1090	9,38	8,01
40	83,33	1101	9,33	7,07
50	77,38	1109	7,35	10,0
60	79,52	1117	6,08	8,95
70	84,69	1120	6,37	6,46
80	78,21	1123	6,48	9,65
90	85,32	1131	6,98	6,20
100	79,73	1156	8,08	8,91

**Tabla 2.** Cambios generados en la operación del circuito de molienda

Parámetro	Variable manipulada	Referencia	Cambio
Fracción volumétrica sólidos Φ <sub>v</sub>	Flujo agua gpm	84	± 14
	Flujo sólidos tph	5.6	± 1.7
Presión	Presión psi	12-15	8-18
Composición	Razón mezcla caolín/arena	60/40	0/100 – 100/0

**Figura 2.** Histograma correspondiente a las corrientes del hidrociclón. Condiciones referencia.



El circuito de molienda opera de manera estable con una razón de recirculación C promedio de 2.6 adecuada según el criterio de Bond. En condiciones referencia no existen grandes variaciones en el tiempo de  $C(x)$  (Figura 3), y se mantiene  $d_{50}$  promedio 48 μm, SI 3,4 y cc de 40%, cufra elevada si se tiene en cuenta son las partículas finas que retornan al molino.

Como la viscosidad es función de la razón de mezcla presente en suspensión y del contenido en volumen de sólidos (Figura 4), la función de clasificación se ve fuertemente afectada por dichas variables como se observa en las Figuras 5 y 6.

Esto hecho se asocia con el empaquetamiento “paking” de las partículas al interior de la suspensión consecuencia de la diferencia de forma y de tamaño de los minerales. La presión tiene un impacto menor sobre el desempeño del clasificador. (Figura 7). En general, a medida que la presión o la viscosidad aumentan (esto disminuyo porcentaje de kaolín o Φ<sub>v</sub> del alimento) la curva se desplaza a la izquierda.

Si evaluamos el cortocircuito, de manera general, este aumenta con incrementos en la fracción volumétrica de sólidos, y es independiente de la presión y de la composición para suspensiones con un contenido de caolín entre 40 y 90%. El cortocircuito más bajo se encontró en suspensiones monominerales de arena, que además mostraron un SI alta (0.55). Los resultados obtenidos sugieren que arcilla adicionada entre 40 y 90% solo controlan el diámetro de corte, y no tienen efectos significativos sobre otros criterios de clasificación. Cambios en la fracción volumétrica del alimento debidas a variaciones en el flujo de sólidos generan cortocircuitos un poco mayores debido a la sedimentación obstaculizada y el incremento de las partículas finas arrastradas por las gruesas hacia la descarga. En cuanto al producto del circuito (rebalse del hidrociclón), los resultados mostraron que la humedad del rebalse tiende a disminuir con incrementos tanto en el contenido porcentual de caolín como de la fracción volumétrica de sólidos (Figura 8). Así mismo, para el retenido en malla 325 este se disminuye con incrementos en el porcentaje de caolín y reducciones en la fracción volumétrica de sólidos. La presión no mostró un efecto considerable en la respuesta de la humedad y el retenido en malla 325 del rebalse del hidrociclón.

### 3.2. Diseño Sistema de Control

#### 3.2.1. Respuesta del sistema en lazo abierto

En total se obtuvieron cuatro respuestas en lazo abierto del sistema. La Figura 9 muestra el comportamiento del tamaño de partícula y de la humedad ante cambios en la tasa de alimento de mineral y de agua a la salida del molino.

Figura 3. Curvas de clasificación para condiciones referencia.

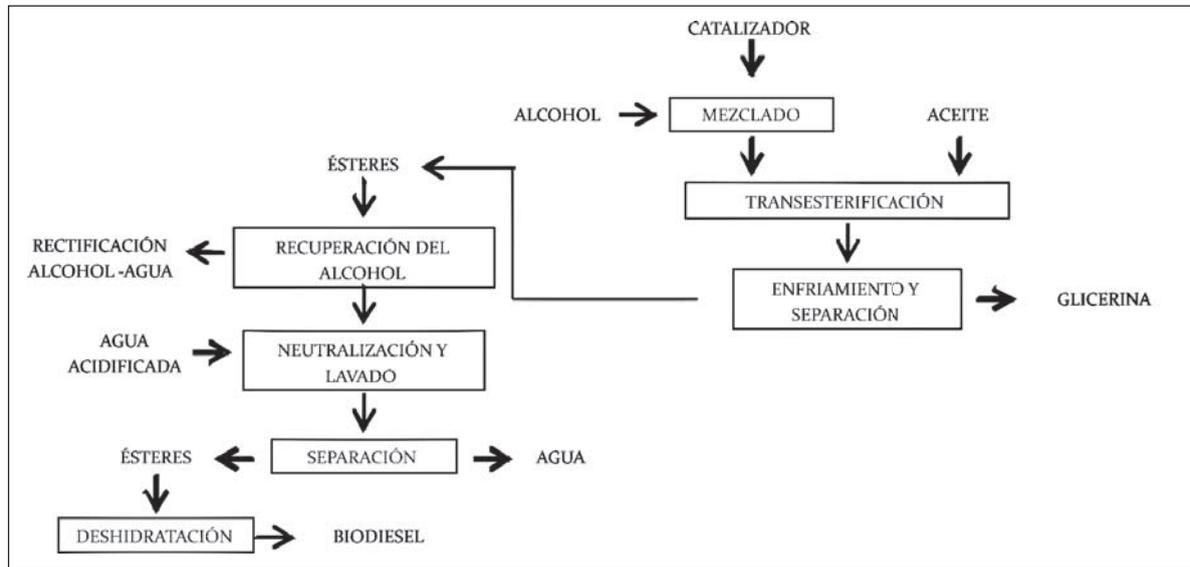
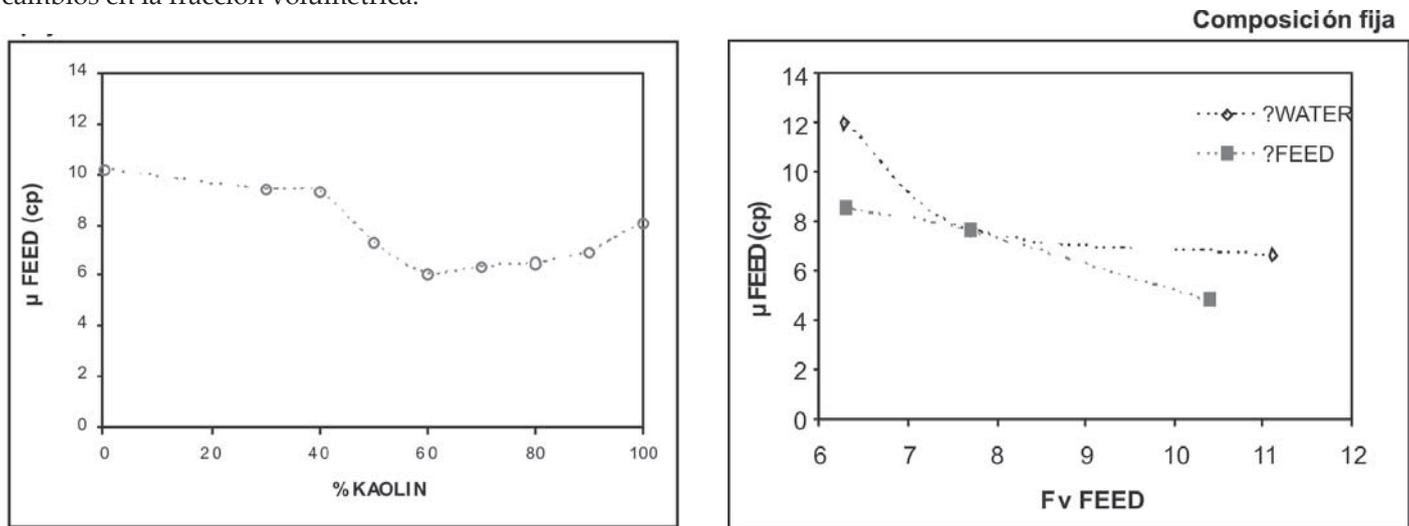


Figura 4. Viscosidad alimento para diferentes mezclas caolín/arena. Fracción volumétrica fija y Viscosidad alimento con cambios en la fracción volumétrica.



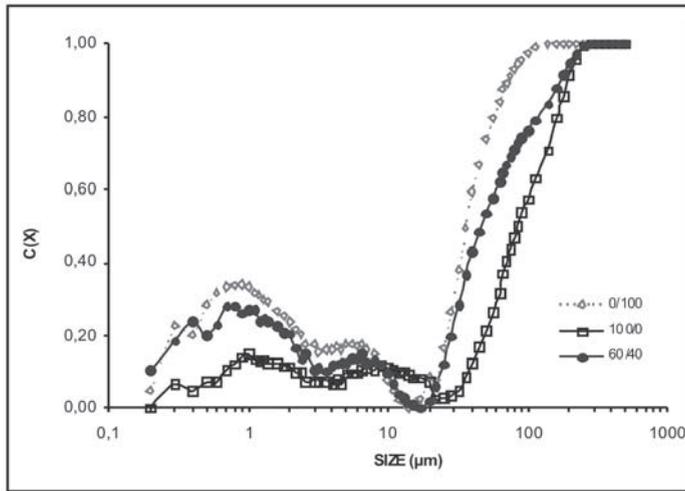
Cambios positivos en la tasa de alimento generan aumentos en el tamaño de partícula lo que se traduce en la incapacidad que tiene el molino de procesar una cantidad más grande de partículas gruesas (aumento del retenido). Cambios positivos en la tasa de agua a la salida del molino inicialmente causan una clasificación fina pero posteriormente, la descarga del molino aumenta rápidamente su granulometría.

### 3.2.2. Desarrollo del modelo

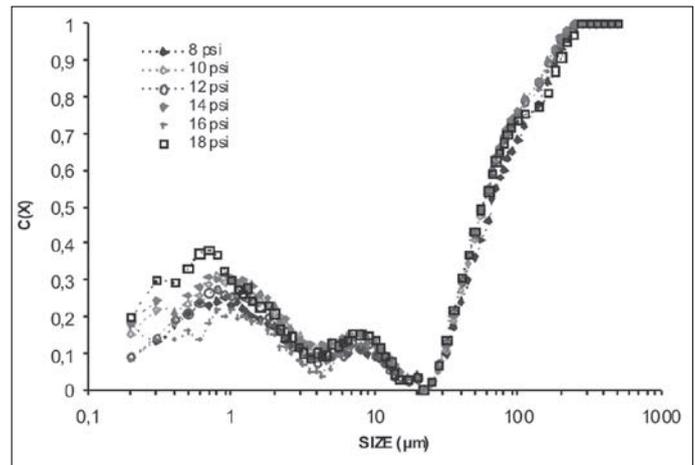
El modelo que representa el circuito de molienda utilizado es el de caja negra de dos entradas y dos salidas, el cual se obtiene a partir de las respuestas en lazo abierto. Donde

las variables manipuladas son  $F_f$  y  $W_d$  y las variables controladas son  $S_p$  y  $H_m$ . Una vez obtenidos los modelos mediante funciones de transferencia que relacionan las variables manipuladas y controladas se procede hacer una validación del modelo, esto para establecer si este sigue la respuesta del proceso y así diseñar el sistema de control centralizado que permita mejorar el rendimiento del circuito de molienda. Una prueba simple es comparar en un mismo gráfico los datos experimentales con las funciones de transferencia del modelo desarrollado mediante el software Matlab® y sus herramientas de diseño de sistemas de control. La Figuras 10 muestra el seguimiento del modelo para cada par de variables relacionadas anteriormente.

**Figura 5.** Función clasificación para diferentes razones de mezcla caolín/arena.

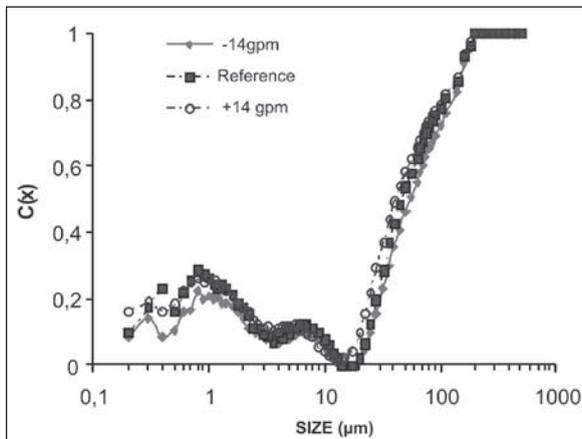


**Figura 7.** Función clasificación para diferentes presiones de entrada.

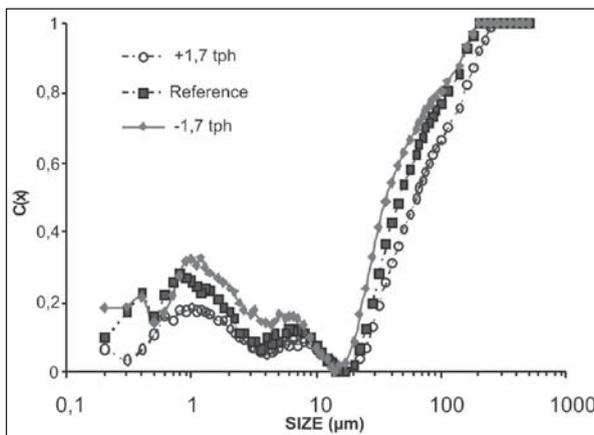


**Figura 6.** Función clasificación para cambios en la fracción volumétrica alimento.

a) Con cambios en el flujo de agua b) Con cambios en la tasa de alimentación.



b) Con cambios en la tasa de alimentación.



Se puede apreciar en todas las figuras que para propósitos de control el modelo lineal obtenido se ajusta muy bien a las dinámicas requeridas por el circuito de molienda. Además se realizó un análisis de sensibilidad el cual mostró la existencia del fuerte grado de interacción que posee la tasa de alimento sobre la DTP y la tasa de agua sobre la humedad.

### 3.2.3 Simulación del sistema de control

Se llevó a cabo mediante la herramienta simulink del software Matlab®. En la Figura 11 se observa la respuesta del circuito de molienda ante cambios en el punto de operación del sistema cuando se simula el controlador centralizado para el tamaño de partícula y el porcentaje de humedad respectivamente.

Lo anterior permite inferir que la respuesta del controlador no presenta sobreimpulso, su tiempo de establecimiento es de 250 segundos y sigue de manera clara los cambios en el punto de operación, tanto para el porcentaje de humedad como para el porcentaje retenido en malla 325. Por otra parte en la Figura 12 muestra la respuesta del controlador cuando se presentan perturbaciones tanto en la tasa de alimento como en la tasa de agua.

A partir de la Figura 20 se puede observar como es la variación del tamaño de partícula cuando se le hace un cambio positivo a la tasa de alimentación de mineral. La distribución de tamaños de partículas (DTP) varía entre 14.9 y 15.07, lo cual introduce un error del 0.5% de desviación respecto al punto de operación. El controlador es capaz de atenuar dicha perturbación, obteniéndose un resultado favorable en el porcentaje retenido en la malla 325, que antes presentaba un error del 33.3% mientras que con este

Figura 8. Variaciones de humedad y porcentaje retenido malla 325 para el rebalse.

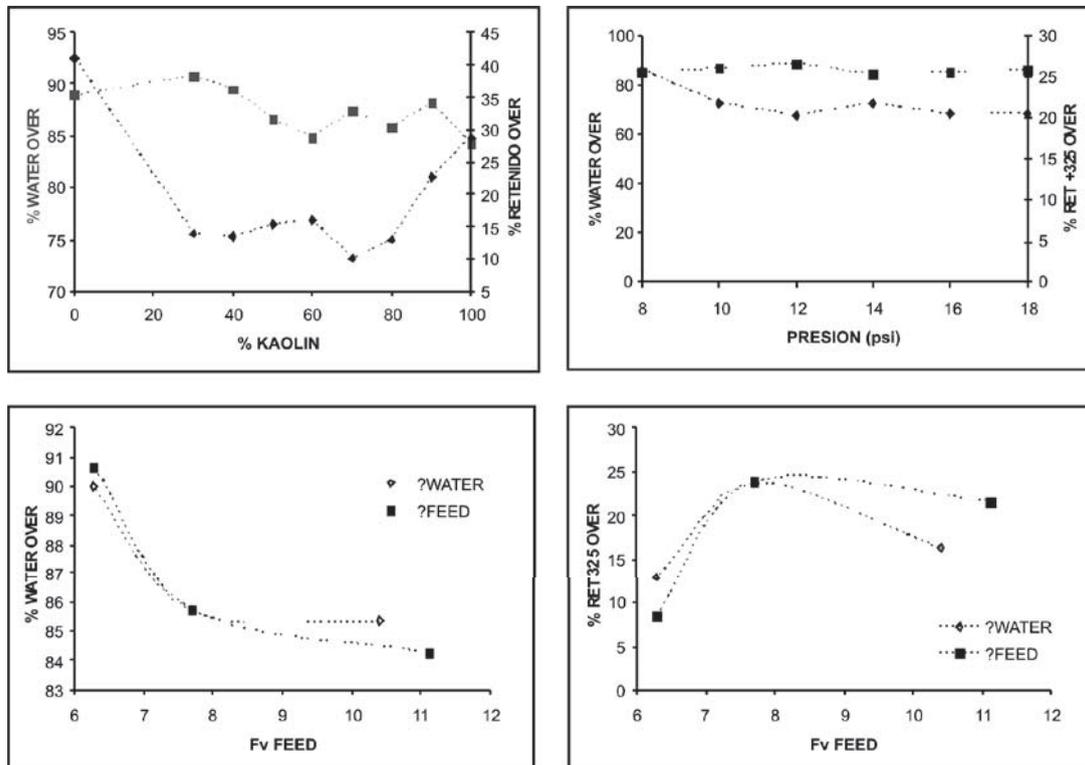


Figura 9. Respuesta dinámica del sistema

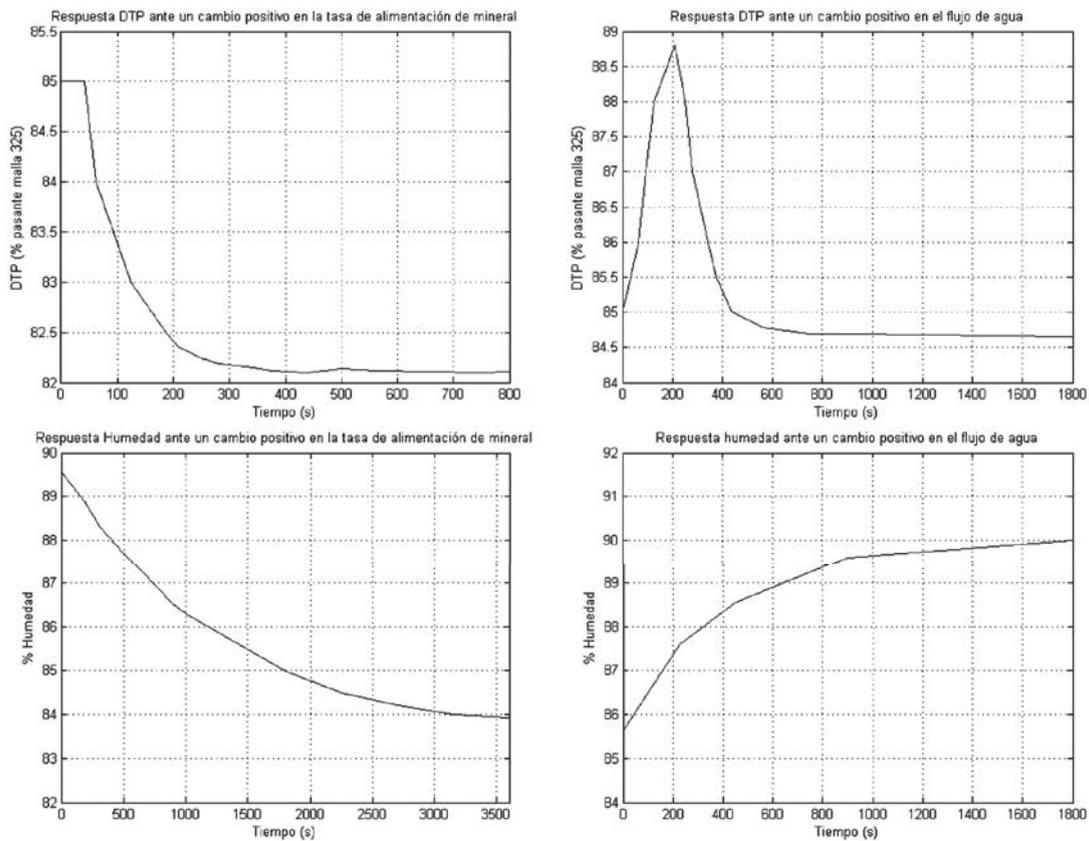


Figura 10. Seguimiento del modelo de Sp y Hm.

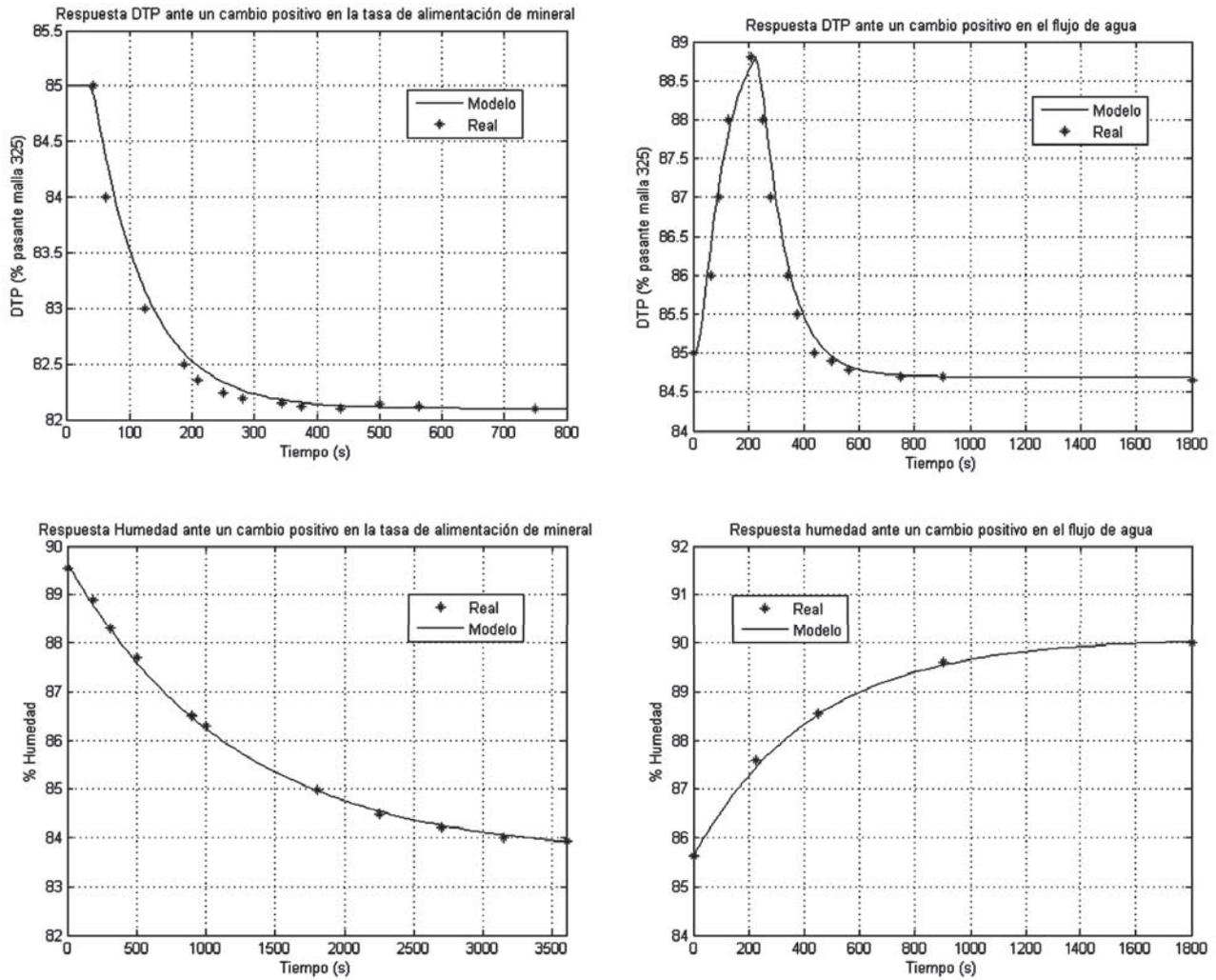


Figura 11. Respuesta de la DTP y % de humedad con el controlador centralizado ante un cambio en el punto de operación.

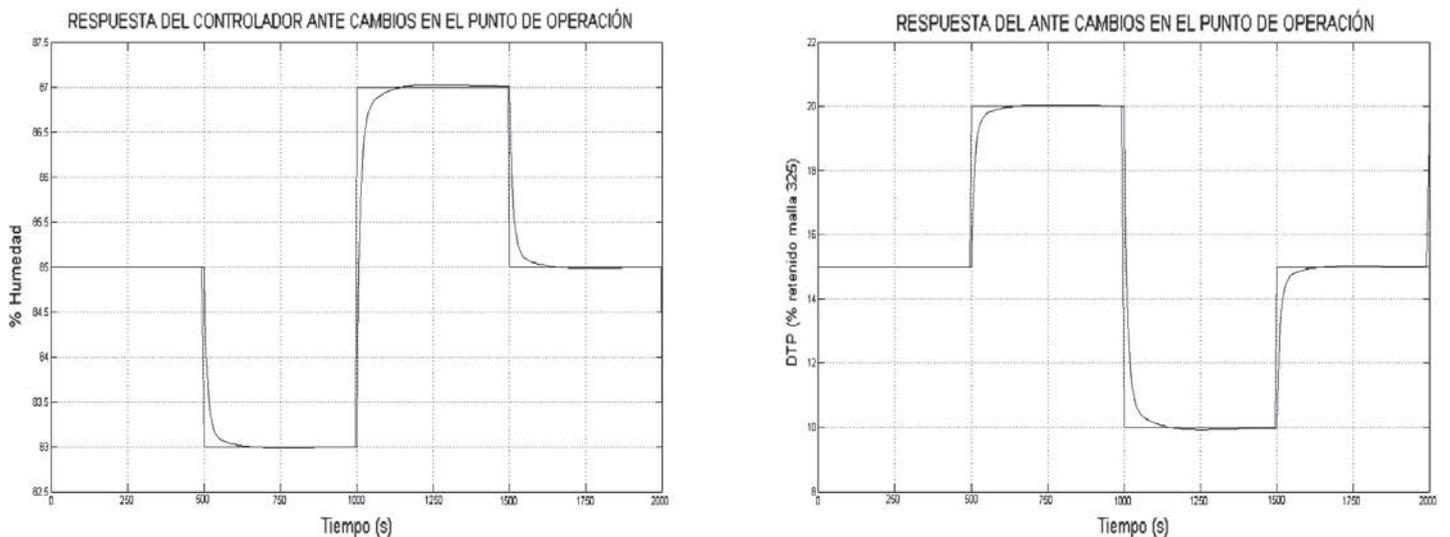
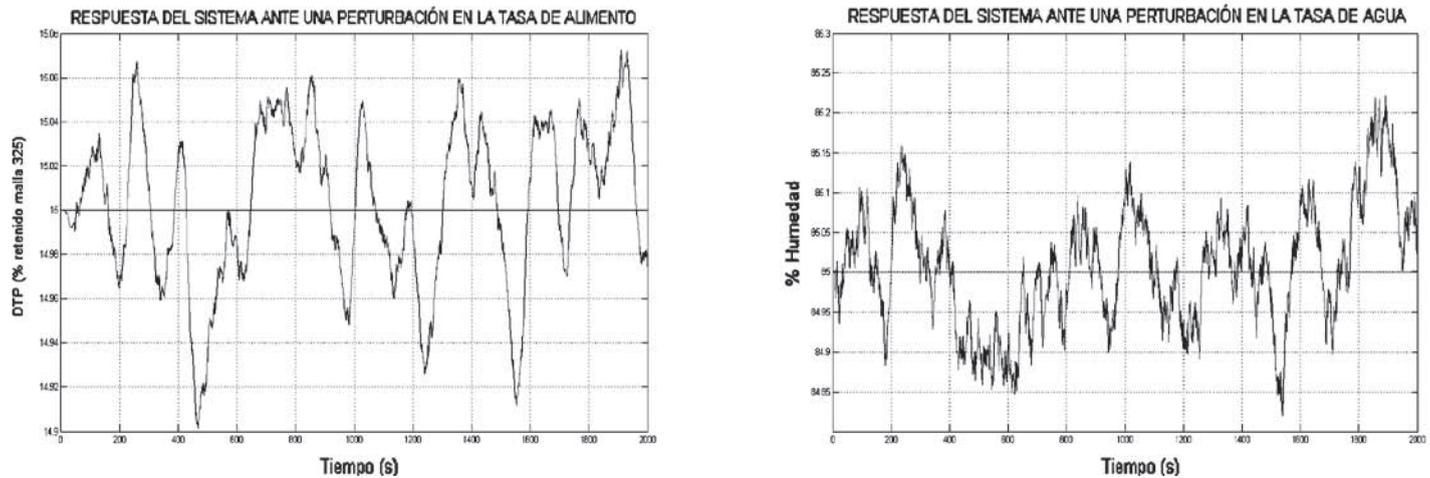


Figura 12. Respuesta DTP y % humedad con el diseño del controlador



diseño del controlador solo se alcanza el 0.5% de error. De manera similar se aprecia que la variación del porcentaje de humedad se encuentra entre el 84.825 y 85.225 % generándose un error de tan solo del 0.25 % de desviación respecto al punto de operación, resultado que es aceptable ya que se logra atenuar de manera significativa las oscilaciones, pasando del 15.3 % de error a tan solo 0.25%. Con los resultados obtenidos de la simulación se infiere que el diseño del controlador centralizado atenúa considerablemente las perturbaciones generadas.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

En el proceso de molienda y clasificación se hace crucial la identificación de aquellas variables que mas afectan la operación del circuito debido a su importancia para el diseño de los sistemas de control y la evaluación de la operación del hidrociclón equipo que controla las características del producto final. Como los modelos con los que actualmente se evalúan estos sistemas fueron desarrollados para suspensiones de un solo mineral, el hecho que se opere con suspensiones poliminerales implica que por las características dinámicas de estas suspensiones el modelo no se ajuste.

El estudio experimental desarrollado en suspensiones caolín/arena (usadas en varias industrias a nivel nacional), que fue presentado indica que las principales variables que afectan el desempeño de un circuito de molienda son la razón de mezcla, la distribución de tamaño de partícula del alimento al molino, la fracción volumétrica de sólidos tanto a la entrada del molino como a la entrada del hidrociclón, la carga circulante y viscosidad. Según los resultados experimentales el empaquetamiento de las partículas juega un papel decisivo tanto en el comportamiento reológico de la suspensión alimentada, como en la acción clasificadora del hidrociclón.

Con base a los resultados obtenidos en simulación es posible mantener el circuito de molienda en un valor estable de operación, tanto para la distribución de tamaño de partícula en el rebalse como para la humedad; con estos resultados se puede predecir que la capacidad del molino puede aumentar significativamente del valor actual de operación que es solo de 6.5 ton/h a su máxima capacidad de diseño que esta en 12 ton/h. Implementar una estrategia de control multivariable que involucre las tres variables predominantes del proceso (DTP, carga circulante, % de sólidos en volumen como indicador de viscosidad) minimiza las perturbaciones y los errores de medida y logra un aumento significativo de la capacidad del molino y una disminución notable en la potencia consumida en esta tipo de procesos.

#### 5. Bibliografía

- [1] Bequette, B.W. Process Control: Modeling, Design, and Simulation. Prentice Hall, NJ, USA. 2002.
- [2] Bristol, E. H., "On a New Measure of Interaction for Multivariable Process Control," Trans. IEEE. Enero 1966.
- [3] Bustamante Rúa, O. Efecto de la geometría de un hidrociclón sobre las condiciones normales de operación, Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 1991. 139 p.
- [4] Bustamante Rúa, O. Reología de suspensiones. Escuela de Ingeniería de materiales. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2002.
- [5] Bustamante Rúa, O. Modelación matemática del tensor de esfuerzo y de la viscosidad de una suspensión mineral.

Tesis de doctor en Ciencias de la Ingeniería Universidad de Concepción. Chile, 2002.

- [6] Conrad A.V.E. & Aldrich C. Neurocontrol of a ball mill grinding circuit using evolutionary reinforcement learning. *Minerals Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1277-1294. 2001.
- [7] Corripio, A.B. & Smith, C.A. Control automático de procesos: Teoría y Practica. Noriega Editores 2000.
- [8] Kawatra, S. K. Bakshi, a. K., Rusesky, M. The effect of slurry viscosity on hydrocyclone classification. *International Journal of Mineral Process* 48, 1996. pp. 39-50.
- [9] Lieslehto, J. "MIMO controller design using SISO controller design methods". *Proceeding of the 13th IFAC World Congress*, pp. 169-173. 1996.
- [10] Morilla, F; Vázquez, F. "Tuning decentralized PID controllers for MIMO systems with decoupling". *Proceeding of the 15th IFAC World Congress*, pp. 2172-2178. 2002.
- [11] Nageswararao K. A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers. *Chemical Engineering Journal* 80 .2000. 251-256 p.
- [12] Neesse, Th., Dueck J. Minkov, L., Separation of finest particles in hydrocyclones, *Minerals Engineering* 17, 2004. 689-696 p.
- [13] Niemi. A.J., Tian L & Ylinen R. 1997. Model predictive control for grinding systems. *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 2, pp 271-278, 1997.
- [14] Nordfeldt, P. "PID Control of TITO Systems". *Licentiate Thesis*, December 2005. Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology. ISRN LUTFD2/TFRT-3228--SE. ISSN 0280-5316. 2005.
- [15] Niederlinski, A. A Heuristic Approach to the "Design of Linear multivariable Control Systems," *Automatic* Vol. 7, No. 691. 1971.
- [16] Pomerleau A, Hodouin D, Desbiens A & Gagnon É. A survey of grinding circuit control methods: from decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers. *Powder Technology* V. 108 Pp 103-115. 2000.
- [17] Radhakrishnan, V.R. Model based supervisory control of a ball mill grinding circuit. *Journal of Process Control* 9:195±211.1999.
- [18] Tavakoli S.; Griffin, I.; Fleming, P. J.: "Tuning of decentralised PI (PID) controllers for TITO processes". *Control Engineering Practice* 14, pp. 1069-1080. 2006.
- [19] Tavares, L.M. Souza, L. Lima, J.R.B. Possa, M.V. Modeling classification in small-diameter hydrocyclones under variable rheological conditions. *Minerals Engineering* 15, 2002. 613-622 p.
- [20] Vázquez, F.; Morilla, F.; Dormido, S. "An iterative method for tuning decentralized PID controllers". *Proceeding of the 14th IFAC World Congress*, pp. 491-496. 1999.
- [21] Vázquez, F.; Morilla, F. "Tuning decentralized PID controllers for MIMO systems with decoupling". *Proceeding of the 15th IFAC World Congress*, pp. 2172-2178. 2002.
- [22] Wang, Q. G.; Hang C. C.; Zou, B. "A frequency response approach to autotuning of multivariable PID controllers", *Proceeding of the 13th IFAC World Congress*, pp. 295-300. 1996.
- [23] Wang, Q. G. "Decoupling Control". *Lecture Notes in Control and Information Sciences*; 285. Springer-Verlag. 2003.
- [24] Yianatos J. et al, The effect of fines recycling on industrial grinding performance. *Department of Radioactive Tracer Applications Chile*. September 2000.