



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

SIMULADOR DINAMICO PARA EL PROCESO DE AGLOMERACION

GONZALO ORLANDO PEREIRA RIOS

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de Ingeniería

Profesor Supervisor:
DR. ALDO CIPRIANO ZAMORANO

Santiago de Chile, (junio, 2014)

© 2014, Gonzalo Orlando Pereira Ríos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

SIMULADOR DINAMICO PARA EL PROCESO DE AGLOMERACION

GONZALO ORLANDO PEREIRA RIOS

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

ALDO CIPRIANO ZAMORANO

JOSE RICARDO PEREZ CORREA

MIGUEL HERRERA MARCHANT

GLORIA CECILIA ARANCIBIA HERNANDEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería
Santiago de Chile, (junio, 2014)

A mis Padres, hermanos y amigos, a los amores de mi vida, por su constante apoyo y entrega en este caminar.

AGRADECIMIENTOS

Este importante proceso ha estado marcado y sustentado por la colaboración de tantas personas que han hecho posible que yo logre este propósito inicial. Desde el apoyo que recibí de mi familia en Bolivia para poder tomar el valor de hacerlo; la acogida de mis compañeros y amigos que han hecho de mi estadía un agrado; el incondicional amor de mi familia en Chile, quienes llegan a mi vida a entregarme todo lo que pudiera soñar; y la confianza de mis profesores, la que me demostró que a pesar de mis dificultades y circunstancias podría salir adelante. Ha sido un largo caminar en una experiencia de dulce y agraz, pero que al final sólo me deja un profundo sentido de agradecimiento a quienes han estado conmigo en diferentes aspectos, quienes me han entregado no sólo su apoyo sino también su conocimiento y su aliento, el cual ha sido fundamental para completar este anhelo. Esto es también de ustedes.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Planteamiento del Problema y Justificación del Estudio.	4
1.3 Objetivos.	5
1.4 Contenidos.....	6
2. PROCESOS EN HIDROMETALURGIA.....	8
2.1 Proceso de Aglomeración.....	10
2.2 Proceso de Lixiviación.	13
2.3 Proceso de Extracción por Solventes.	16
2.4 Proceso de Electro-Obtención.	19
3. MODELO FENOMENOLÓGICO DEL PROCESO DE AGLOMERACIÓN.	21
3.1 Estudio del Proceso de Aglomeración.	21
3.2 Modelamiento - Estado del Arte.	27
3.3 Modelo Dinámico.....	31
4. DESARROLLO Y PRUEBA DEL SIMULADOR.....	37
4.1 Análisis de Plataformas Disponibles.....	37
4.2 Implementación del Simulador.	38
4.3 Calibración del Simulador.....	39
4.4 Validación Cualitativa.....	42
5. DISEÑO Y PRUEBAS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL.	49
5.1 Control Proporcional-Integral-Derivativo.....	49

5.2	Control Predictivo Basado en Modelo.	52
5.3	Análisis Comparativo.	55
6.	CONCLUSIONES.	58
	BIBLIOGRAFIA.	59

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-I: Sistemas de aglomeración comunes	27
Tabla 4-I: Parámetros del Modelo.....	40
Tabla 5-I: Comparación de Controladores Respecto al Error RMS.....	56

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Esquema general del proceso hidrometalúrgico.....	3
Figura 2-1: Esquema general del proceso hidrometalúrgico.....	9
Figura 2-2: Proceso de aglomeración.....	11
Figura 2-3: Vista esquemática de la formación de glómeros.....	12
Figura 2-4: Esquema del proceso de aglomeración.	13
Figura 2-5: Esquema del proceso de lixiviación.	15
Figura 2-6: Esquema del proceso de extracción por solventes.	18
Figura 2-7: Esquema del proceso de electro-obtención.	20
Figura 3-1: Esquema del tambor aglomerador.....	26
Figura 3-2: Variables y parámetros del proceso de aglomeración.	32
Figura 4-1: Variación del flujo másico total de salida ante variaciones del flujo másico (sólido y líquido) de entrada.....	44
Figura 4-2: Humedad contenida en los glómeros de salida ante variación del flujo másico de líquido (agua/ácido).....	45
Figura 4-3: Humedad contenida en los glómeros de salida ante variación del flujo másico de mineral.....	46
Figura 4-4: Distribución granulométrica de glómeros para diferentes valores de humedad.	47
Figura 5-1: Respuesta del sistema para un controlador PID.	50
Figura 5-2: Respuesta del sistema para un controlador PID con perturbación.	51
Figura 5-3: Respuesta del sistema ante un controlador MPC.	53

Figura 5-4: Respuesta del sistema ante un controlador MPC con perturbación.	54
Figura 5-5: Comparación entre respuestas de controladores PID y MPC.....	55
Figura 5-6: Comparación entre respuestas de controladores PID y MPC con perturbación.	56

RESUMEN

El control del proceso de aglomeración en la recuperación de mineral por la vía hidrometalúrgica es de gran interés en la industria minera, principalmente por el impacto que este proceso tiene en procesos posteriores, y por ende, el impacto económico que puede generar si el proceso de aglomeración no entrega el producto deseado al proceso siguiente, la lixiviación. Para estudiar el comportamiento de dicho proceso, y evaluar el desempeño de diferentes estrategias de control es muy útil contar con una herramienta de simulación que permita reproducir las relaciones causa-efecto que caracterizan al proceso. Sin embargo, a la fecha no se dispone de simuladores dinámicos del proceso de aglomeración aplicados a la hidrometalurgia.

Este trabajo se inicia con una descripción de los procesos propios de la hidrometalurgia, para posteriormente discutir diferentes modelos conocidos del proceso de aglomeración. A continuación se presenta el desarrollo del simulador y algunas pruebas que permiten su validación cuantitativa. El trabajo finaliza con la aplicación del simulador a la evaluación de las estrategias de control, considerando estrategias basadas en controladores PID y MPC.

Palabras Claves: Aglomeración, hidrometalurgia, simulación, control de proceso, estrategia de control.

ABSTRACT

The agglomeration process control in mineral recovery by hydrometallurgical route is of great interest in the mining industry, mainly because of the impact this process has on subsequent processes. Therefore, an economic impact can be generated if the agglomeration process does not deliver the desired product to the next process, leaching. To study the behavior of the process, and evaluate the performance of different control strategies, it is very useful to have a simulation tool that allows to reproduce the cause-effect relationships that characterize the process. However, to date there is no dynamic simulators for the agglomeration process applied to hydrometallurgy.

This paper begins with a description of the hydrometallurgy processes, then different models for agglomeration process are discussed. Following the development of the simulator and some tests that allow its quantitative validation are presented. The work ends with the application of the simulator for the evaluation of control strategies, based on PID and MPC control.

Keywords: Agglomeration, hydrometallurgy, simulation, process control, control strategy.

1. INTRODUCCION.

1.1 Antecedentes.

Diseñar el ambiente y dimensionar los recursos computacionales que una organización necesita y su crecimiento en el tiempo, es una tarea que puede ser realizada de muchas formas diferentes.

Por esta razón, la simulación de procesos industriales mediante un computador se ha convertido, en los últimos tiempos, en una herramienta tecnológica que es utilizada ampliamente para distintos fines en diferentes ámbitos ingenieriles, como por ejemplo diseño de equipos y sistemas, optimización de operaciones, entrenamiento de operadores, diseño e implementación de estrategias de control, entre otros.

Estos simuladores se basan en modelos matemáticos que describen el comportamiento del proceso, implementados en alguna plataforma de software disponible en el mercado.

Dependiendo de la aplicación, los simuladores pueden desarrollarse considerando factores como el comportamiento temporal, el nivel de precisión requerido o el tipo de modelo a utilizar y el tipo de variables que se consideran en los mismos.

En el presente trabajo, el simulador está dirigido a la hidrometalurgia, más específicamente al proceso de aglomeración, que como se verá y describirá más adelante, es el proceso inicial, después del chancado secundario.

La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia que abarca la extracción y recuperación de metales a través de soluciones acuosas y orgánicas. Se basa en la concentración de iones, es decir de los metales que por reacciones químicas y diferencias físicas de las soluciones son separados y aislados de forma específica. Como resultado se obtiene una solución rica en el ion de interés y con características propicias para la próxima etapa productiva.

La hidrometalurgia en la actualidad se presenta como una de las vías más importantes de recuperación de minerales, especialmente para oro, cobre y zinc. En comparación con otros procesos presenta ventajas evidentes, sobre todo medioambientales porque no genera gases contaminantes, dando lugar a una producción más limpia. Por otro lado, mediante la hidrometalurgia es posible tratar minerales de baja ley obteniendo un alto grado de recuperación y, por ende, un producto de alta pureza en la etapa de electro-obtención. Además, es un proceso que, en general, requiere de bajos costos de producción por lo cual es altamente conveniente para las empresas dedicadas al rubro.

En la hidrometalurgia existen distintos procesos, como se puede observar en la Figura 1-1, para cada uno de los cuales se han desarrollado diversos modelos fenomenológicos.

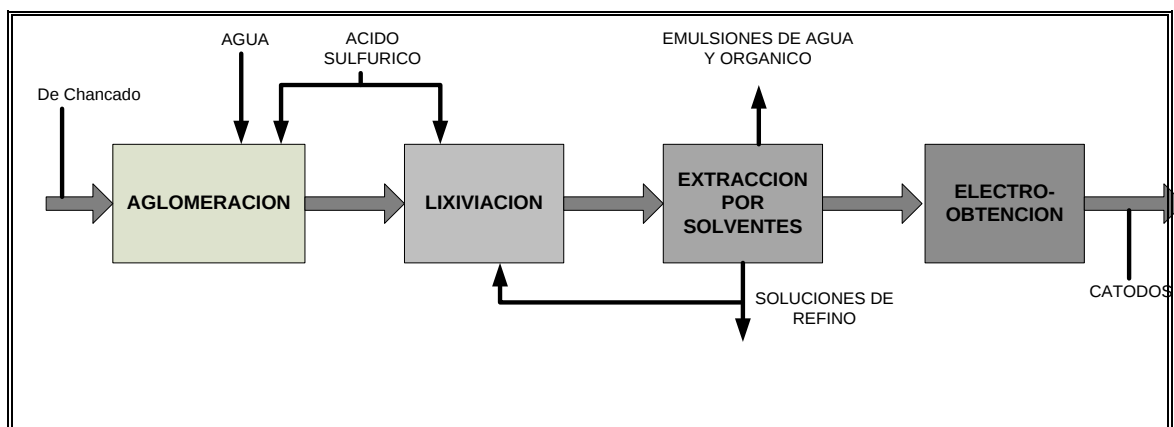


Figura 1-1: Esquema general del proceso hidrometalúrgico.

Entre estos procesos se encuentran los procesos de aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

El proceso de aglomeración, proceso de interés en el presente trabajo, es el posterior al chancado y previo a la lixiviación. Consiste, en resumen, en la unión sucesiva de dos o más partículas sólidas mediante la adición en una fase líquida que actúa como agente aglomerante, todo esto dentro de un tambor que se encuentre agitado (Collao, 2004).

Para el proceso de aglomeración se han desarrollado investigaciones que describen el proceso a través de modelos dinámicos, con el fin de obtener distintas respuestas. Después de revisar la literatura correspondiente, en esta investigación se estimó conveniente utilizar un modelo que dé como respuesta la distribución del tamaño del mineral que constituye el producto del proceso. Este modelo considera a la humedad presente en la formación de los glómeros, variable relevante en el proceso. De todas las técnicas existentes en aglomeración, la más común es el

tambor aglomerador. Dicho proceso y las variables que intervienen se detallarán más adelante.

1.2 Planteamiento del Problema y Justificación del Estudio.

El proceso de aglomeración, en general, es el proceso de la hidrometalurgia más complicado de controlar por su naturaleza, ya que al desarrollarse en un tambor giratorio es difícil realizar mediciones de las variables que intervienen en el mismo, como por ejemplo de la humedad, variable crítica en el proceso. Por esta razón, en la operación se consideran fundamentalmente las restricciones sobre el producto que debe ser tratado en la lixiviación. El control de la aglomeración se realiza generalmente en forma manual, variando la inyección de soluciones según el proceso de lixiviación lo requiera, lo que conlleva, como es natural, a elevar los costos de operación.

Los estudios y trabajos conocidos en cuanto a controlar el proceso de aglomeración son escasos y limitados, debido a la complejidad del mismo. Dentro de los trabajos recopilados que más análisis se hace con respecto al tema se encuentran los de Wang et al. (2002, 2006 y 2007), donde, bajo un determinado modelo aplica un control óptimo para determinar la respuesta del sistema en tambor rotatorio.

Tampoco se conocen simuladores dinámicos especializados que permitan estudiar el comportamiento fenomenológico del proceso y que se puedan utilizar para diseñar y evaluar estrategias de control. Todo esto bajo una plataforma de simulación que sea accesible a los usuarios y que utilice un lenguaje de

programación adecuado para el estudio, el análisis y el diseño de sistemas de control.

Este trabajo pretende contribuir al desarrollo del rubro minero focalizado en los procesos hidrometalúrgicos para la extracción de minerales de cobre. Aunque se han publicado trabajos sobre modelación, simulación y optimización de estos procesos, aún existe la necesidad de contar con herramientas computacionales para comprender mejor su comportamiento y mejorar la relación eficiencia/capacidad de operación.

Para realizar esto, una vez concluida la revisión de la literatura, se procedió al estudio del modelo seleccionado, identificando las distintas variables, de entrada y salida, y los parámetros que intervienen en el mismo. Luego se desarrolló e implementó el simulador en la plataforma seleccionada. Finalmente, se investigó el desempeño de diferentes estrategias de control, haciendo uso del simulador.

1.3 Objetivos.

El objetivo general del presente trabajo, es desarrollar un simulador dinámico para el proceso de aglomeración, utilizando un software adecuado que permita describir, analizar y comprender el comportamiento dinámico del proceso mediante simulaciones, facilitando el análisis y el estudio de diferentes estrategias de control.

Entre los objetivos específicos planteados para el desarrollo del presente trabajo, se cuenta:

- Revisar los modelos dinámicos existentes y definir el más apropiado para el desarrollo del simulador.
- Identificar las variables de proceso, entradas y salidas, y los parámetros que componen el proceso y los modelos dinámicos.
- Desarrollar el simulador y validarlo determinando el efecto de variables y parámetros sobre el producto obtenido.
- Aplicar estrategias de control al simulador del proceso para analizar su desempeño considerando indicadores claves.

1.4 Contenidos.

El presente trabajo se centra, como se mencionó anteriormente, en el proceso de aglomeración.

El estudio comienza con una breve descripción general de toda la vía hidrometalúrgica en el Capítulo 2, para lo cual se revisa cada una de las etapas que intervienen, detallándose las características más importantes y mencionando esquemáticamente algunas de las variables y los parámetros que son relevantes.

En el Capítulo 3 se analiza el proceso de aglomeración, describiéndolo detalladamente, a diferencia de la descripción superficial del segundo capítulo. La revisión del estado del arte del modelamiento del proceso se presenta también en este capítulo. Además se describe el modelo dinámico seleccionado para el desarrollo del simulador, el que se compara con los demás modelos existentes. Se

destacan las ventajas que ofrece el modelo para aplicar estrategias de control, que es uno de los objetivos del estudio.

El Capítulo 4 contiene la descripción del desarrollo del simulador y las pruebas realizadas al mismo, partiendo por las plataformas de software disponibles. Se explica cómo se implementó el simulador y la forma en el que se calibrará, presentando los datos utilizados para realizar las pruebas y el análisis de las respuestas.

Finalmente, el Capítulo 5 describe una aplicación práctica del simulador, para lo cual se realiza en primer lugar un estudio y el respectivo análisis de tres estrategias de control aplicadas en investigaciones conocidas, las que se comparan utilizando el simulador.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas tras la presente investigación.

2. PROCESOS EN HIDROMETALURGIA.

La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva que tiene como objetivo la recuperación de metales desde los minerales y rocas que los contienen, mediante métodos físicos y químicos (Domic, 2001).

El nombre de hidrometalurgia se debe a que la extracción de los metales se realiza mediante métodos físico-químicos *acuosos*. En general la hidrometalurgia consta de las siguientes etapas distintivas y secuenciales (Domic, 2001):

- Etapa de disolución selectiva, desde los sólidos que contienen los minerales hasta la disolución mediante una solución acuosa, permitiendo que el material soluble (mineral) se disuelva y se “filtre” a través del material no soluble.
- Etapa de procesamiento y transformación de los metales disueltos en el medio acuoso, mediante agentes externos que permiten la concentración de éstos, por ejemplo, mediante el intercambio iónico líquido.
- Etapa de recuperación selectiva de los iones metálicos disueltos en el medio acuoso, obteniéndose el metal en forma de un producto sólido mediante un proceso de electrolisis que deposita el mineral recuperado en un cátodo.

Estas etapas incluyen distintos procesos, entre ellos chancado, aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y finalmente electro-obtención, los cuales se describirán brevemente a continuación (ver Figura 2-1).

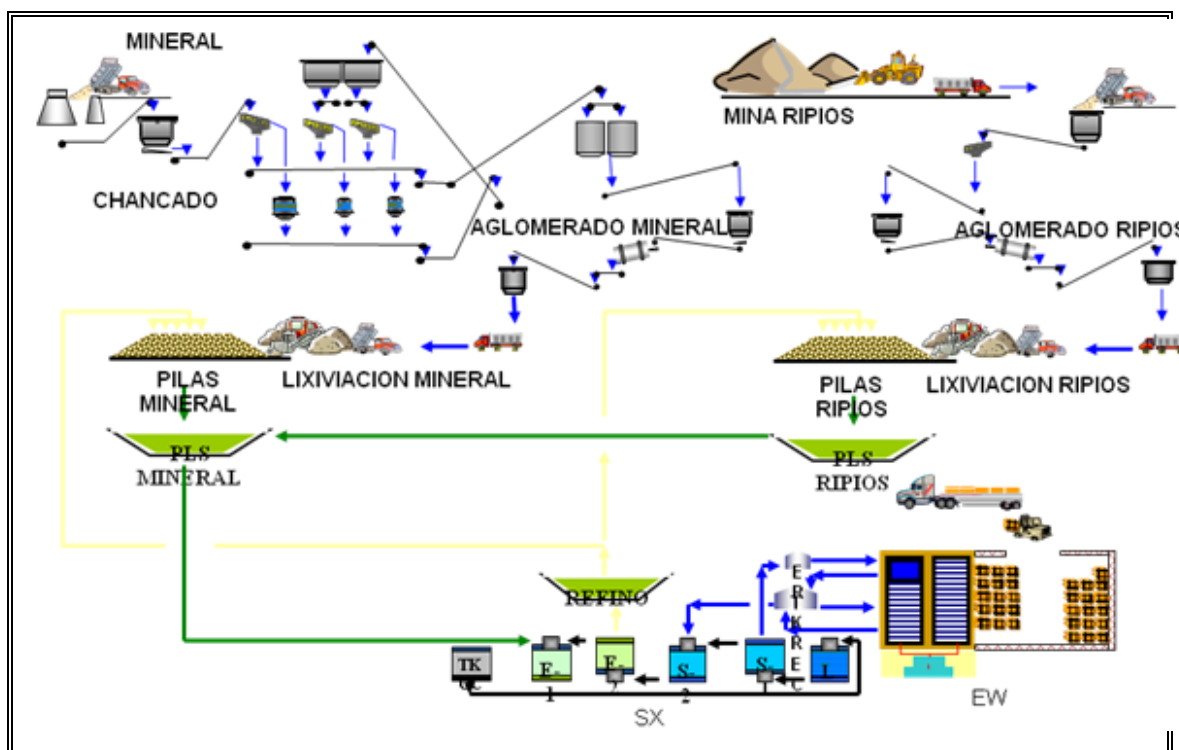


Figura 2-1: Esquema general del proceso hidrometalúrgico (Fuente: Web Codelco).

En general, la vía hidrometalúrgica comienza con una etapa de preparación del mineral, que generalmente consiste en el chancado, para luego someter al mineral a las etapas de aglomeración y lixiviación. A continuación viene la etapa de recuperación, que puede realizarse por diferentes rutas y cuya elección depende de factores como las características del mineral, la concentración de la solución obtenida en la lixiviación y el producto deseado.

La lixiviación es una operación de transferencia de masa sólido-líquido, que puede ocurrir en condiciones ambiente o a elevadas temperaturas y/o bajo presión, dependiendo de las reacciones que se llevan a cabo. El agente lixivante debe cumplir con varias características, entre las cuales figura la capacidad de disolución rápida, manteniéndose como un inerte con las especies químicas de la ganga, tener bajo costo y estar disponible en grandes cantidades.

La extracción por solventes (SX) es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas provenientes de procesos de lixiviación. Su principal aplicación se encuentra en la producción de cobre, aunque también se aplica para la obtención de uranio, vanadio, molibdeno y boro, entre otras especies. Por su amplia utilización, en especial en la industria minera del cobre, se han desarrollado diversos estudios de modelación y simulación de este proceso (Komulainen, 2007).

Finalmente, la electro-obtención (EW), es un proceso que consiste en la recuperación del metal desde la solución electrolito (solución acuosa proveniente de SX), por un proceso de electrólisis para depositarlo en un cátodo, obteniendo como producto el metal de interés con alto grado de pureza, hasta de 99,5% según el mercado de Londres.

2.1 Proceso de Aglomeración.

El proceso de aglomeración consiste en esencia en la adhesión de partículas finas a las gruesas, que actúan como núcleos o la aglomeración de los finos con los finos, según sea la distribución de tamaños en la alimentación (ver Figura 2-2).

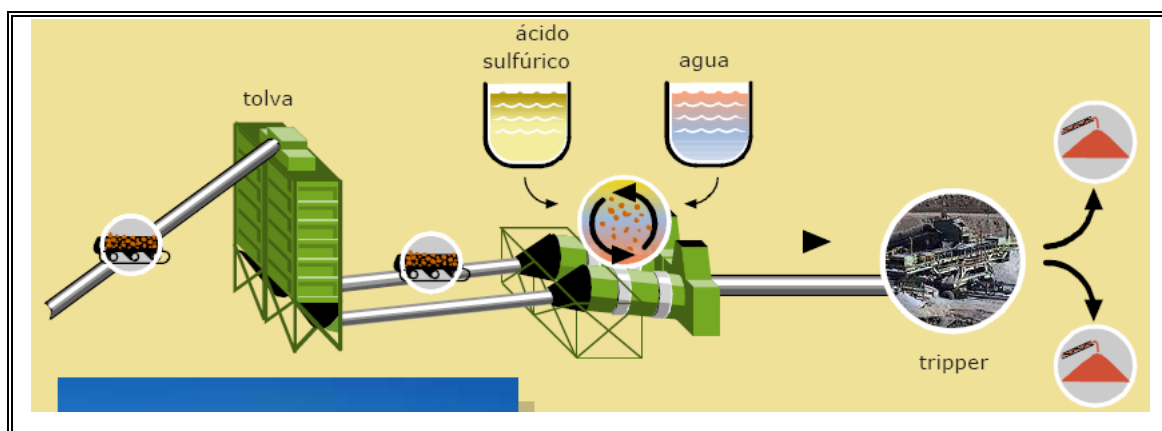


Figura 2-2: Proceso de aglomeración (Fuente: Web Codelco).

En este proceso el equipo central es el tambor aglomerador, donde se mezcla el ácido sulfúrico, el agua y el material tal como se observa en la Figura 2-2. Consiste en un cilindro inclinado girando a baja velocidad, ocasionando el deslizamiento (cascada) y la aglomeración del mineral previamente mojado con agua y/o adherentes. Se practica también la aglomeración en depósitos (stock), en cintas transportadoras y en platos.

En el proceso de aglomerado en tambor rotatorio, el material es depositado en una tolva y por gravedad es transportado por dos correas que alimentan a los tambores aglomeradores, que operan a una cierta velocidad de rotación, para después mezclarlo con ácido sulfúrico concentrado y con agua caliente.

Este proceso aumenta la temperatura del material y su humedad aproximadamente en un 10%, mejorando la porosidad, oxigenación, permeabilidad y el escurrimiento de la solución para facilitar la extracción del metal.

Del proceso se extraen los glómeros que son partículas que resultan de la aglomeración de dos o más partículas (ver Figura 2-3). Los glómeros están compuestos por partículas primarias, las cuales tienen un rango de diámetro de 0.20 a 25.00 mm. aproximadamente, que son las existentes provenientes del chancado antes de que el material sea sometido a la aglomeración (Collao, 2006).

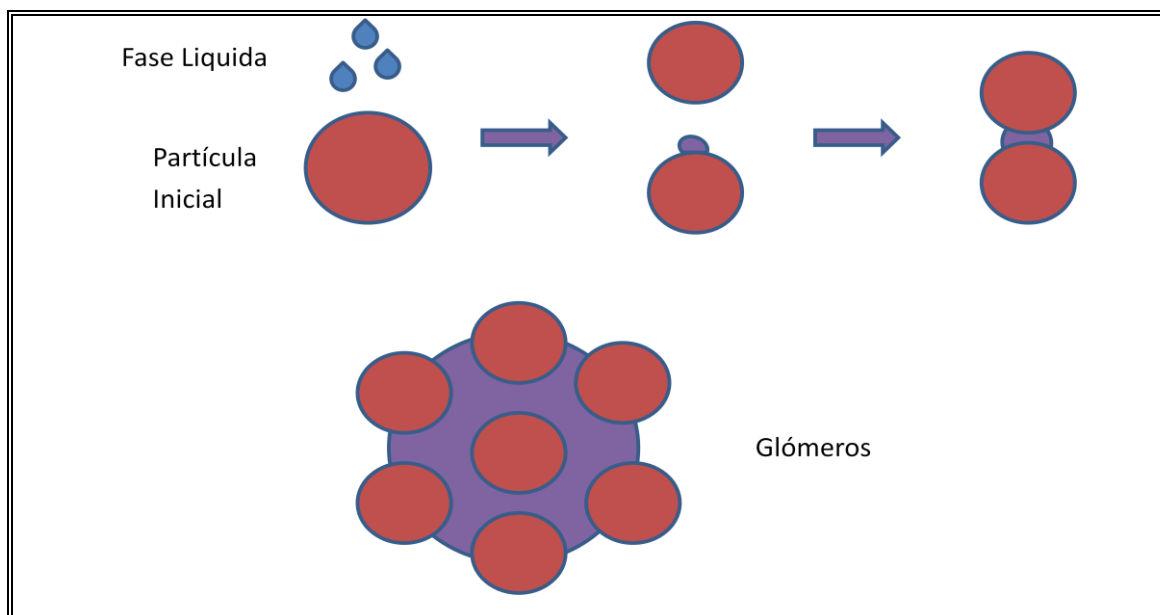


Figura 2-3: Vista esquemática de la formación de glómeros (Fuente: Collao, 2006).

En la Figura 2-4, se puede observar el esquema del proceso de aglomeración donde se resalta que luego de una reducción de tamaño del mineral, este ingresa al

tambor aglomerador y los glómeros que salen de dicho tambor pasan al proceso siguiente, el proceso de lixiviación.

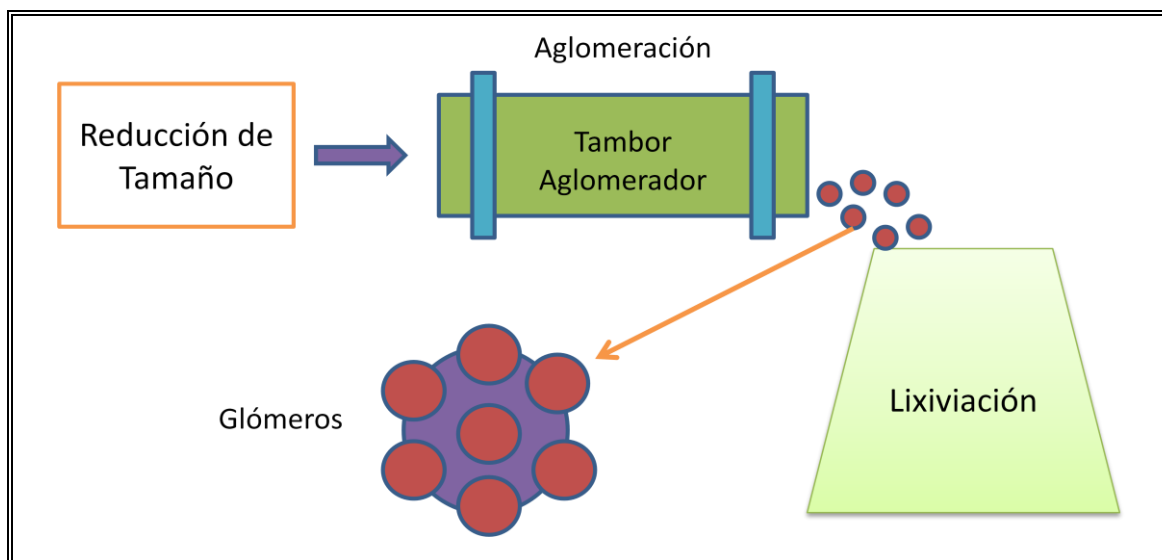


Figura 2-4: Esquema del proceso de aglomeración (Fuente: Collao, 2006).

2.2 Proceso de Lixiviación.

En general, la práctica industrial de la lixiviación se realiza según diferentes métodos que se seleccionan de acuerdo a factores técnicos y económicos en el análisis de un proyecto.

Entre los diferentes métodos de lixiviación se encuentran por ejemplo: percolación (lixiviación estática) y agitación (lixiviación dinámica). La lixiviación por percolación consiste en que el agente lixivante percola a través de la masa estática

de mineral, proceso que puede realizarse de varias formas: lixiviación “in situ”, en bateas y en pilas.

En la lixiviación por agitación, el mineral es reducido a tamaños finos, es decir un promedio de 10 mm., y se agita con el disolvente en un recipiente.

Hoy en día, la lixiviación en pilas se presenta como la etapa de extracción más importante dentro de la hidrometalurgia del cobre, debido a las ventajas que presenta tanto por su bajo costo de producción y energético, como por la posibilidad de tratamiento de minerales pobres y al bajo grado de contaminación ambiental.

Entre los métodos de lixiviación se tiene:

- “In Situ”. Se refiere a un proceso de recuperación a través de perforaciones realizadas en las formaciones rocosas que evita recurrir a las técnicas mineras convencionales.
- “In Place”. Se refiere a la lixiviación de residuos fragmentados dejados en minas abandonadas.
- En bateas. Esta técnica consiste en contactar un lecho de mineral con una solución acuosa que percola e inunda la batea o estanque. Los minerales a tratar por este método deben presentar contenidos metálicos altos o muy altos, con una ley sobre 95, debiendo ser posible lixiviar el mineral en un período razonable, aproximadamente un mes.
- En pilas. El mineral procedente de la explotación, a cielo abierto o subterránea, debe ser previamente preparado en una planta de chancado y/o aglomerado, para

conseguir una granulometría controlada que permita un buen coeficiente de permeabilidad.

Preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada para proceder a su riego con la solución lixivante, como se muestra en la Figura 2-5. Tras percolar a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos (solución rica) que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal). Las aguas sobrantes del proceso vuelven a ser acondicionadas para ser recicladas hacia las pilas. También en algunos casos es preciso añadir agua nueva, para reponer las fuertes pérdidas de evaporación del circuito.

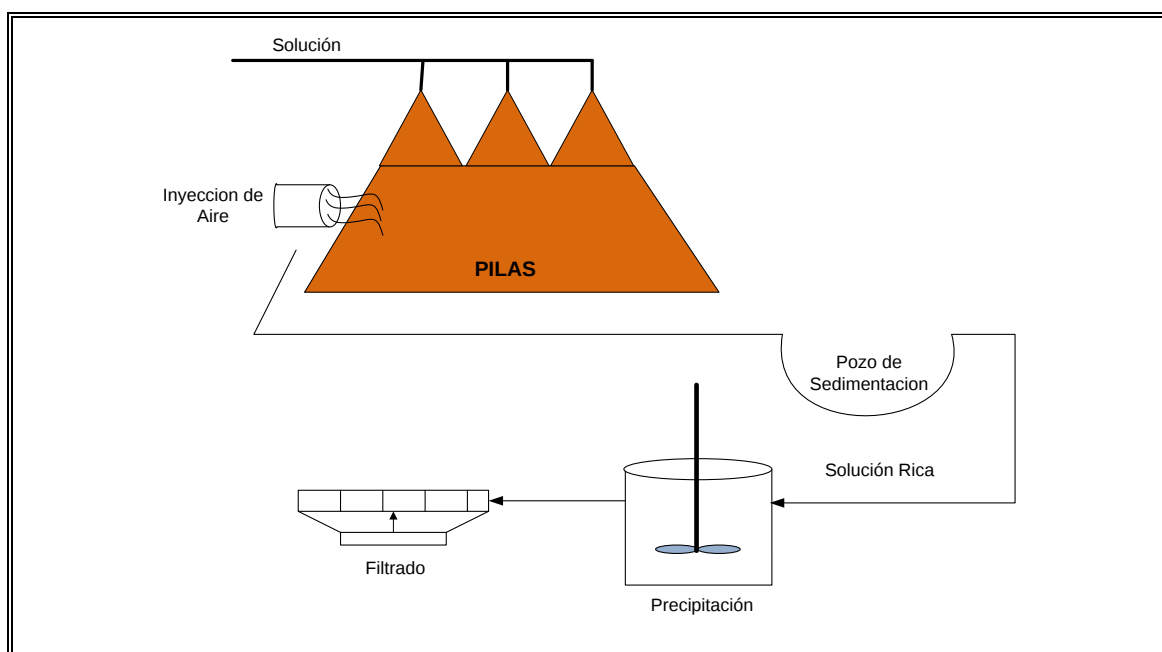


Figura 2-5: Esquema del proceso de lixiviación.

En el proceso de lixiviación en reactivos agitados es posible manipular diferentes variables como el flujo de la solución, el flujo de la inyección de aire, y la velocidad del agitador en la precipitación, permitiendo de esta manera controlar variables como la recuperación de reactivos sólidos y la concentración de solución lixivante.

Las soluciones obtenidas en la etapa de lixiviación son enviadas a una o más operaciones de recuperación. Cuando se incluye más de una operación, el objetivo es purificar la solución. Esta purificación es generalmente realizada por adsorción, extracción por solventes o por intercambio iónico.

2.3 Proceso de Extracción por Solventes.

La planta de extracción por solventes recibe la solución rica generada en la etapa de lixiviación en pilas de minerales a extraer. Esta solución se caracteriza por tener una baja concentración de mineral disuelto, junto con impurezas como el Fe, Cl, Al, Mn, Mg, Na y otros disueltos durante el proceso.

El objetivo del proceso de extracción por solventes es extraer selectivamente el metal contenido en esta solución rica impura, mediante intercambio iónico entre la fase acuosa y el reactivo orgánico denominado extractante. La extracción por solventes, o extracción líquido-líquido, es una operación unitaria que permite purificar y concentrar una amplia variedad de metales. Consiste en el contacto de una fase orgánica, que contiene un extractante, con una fase acuosa que contiene el metal de interés. El extractante reacciona químicamente con el metal, para formar un complejo orgánico-metal, el cual es soluble en la fase orgánica. Las impurezas,

por lo general, no reaccionan con el extractante y se quedan en la fase acuosa. La fase orgánica, que contiene el complejo orgánico-metal, se separa de la fase acuosa. El metal es recuperado y concentrado en otra fase acuosa por la reacción química inversa. Este metal diluido en la solución acuosa debe ser, finalmente, recuperado como producto final, para la cual se somete a una etapa de purificación.

La etapa de purificación puede realizarse por distintas formas, dependiendo de las características de la solución y naturaleza química de la etapa de recuperación precedida. Por ejemplo, si la recuperación se realizó mediante intercambio iónico o adsorción, obteniéndose una solución concentrada en la especie de interés, se puede realizar su purificación mediante cristalización, precipitación iónica o reducción con gas. En caso que de la lixiviación se obtenga directamente una solución de alta concentración, se podría pasar directamente a la purificación utilizando las operaciones anteriores.

La solución captura los iones del metal en forma selectiva. De esta reacción se obtiene, una solución empobrecida en el mineral a extraer. Este reactivo es capaz de descargar el cobre en una etapa posterior del proceso a una solución de alta pureza y concentración de cobre y ácido, formando un electrolito apto para ser depositado en el sector de electro-obtención, como puede observarse en la Figura 2-6.

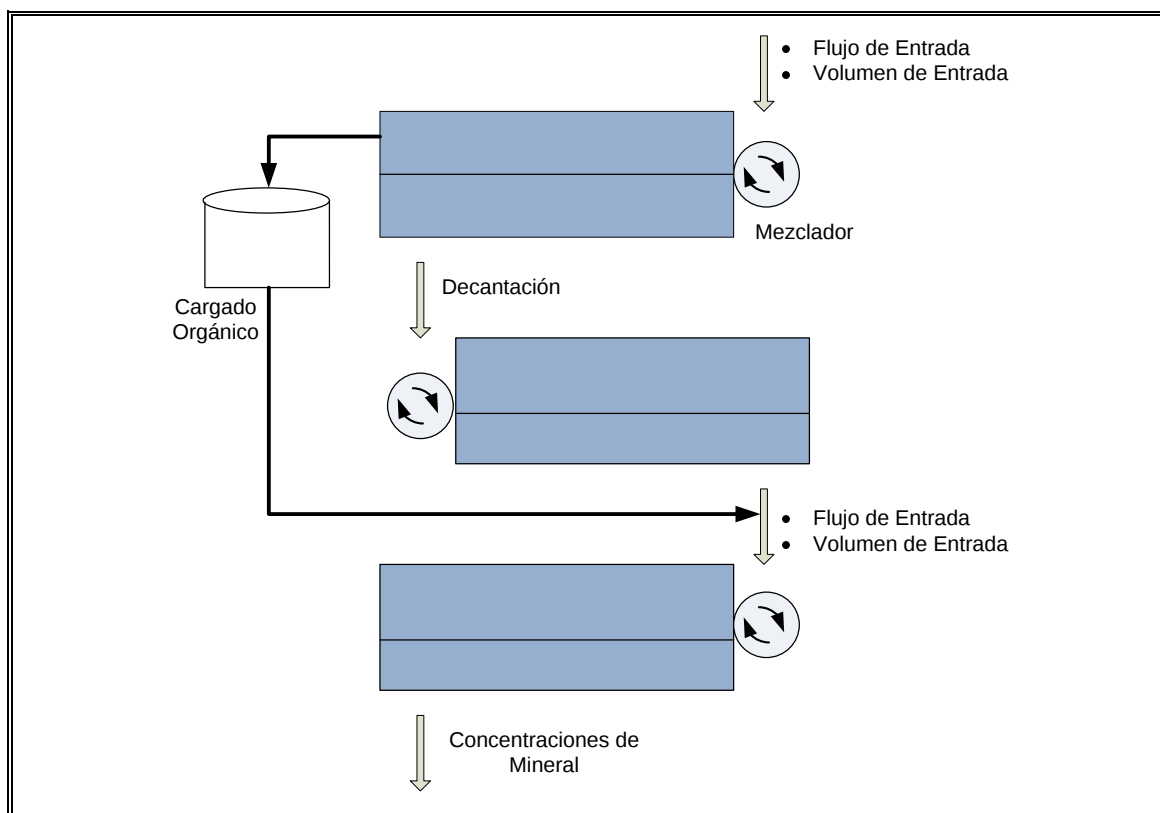


Figura 2-6: Esquema del proceso de extracción por solventes.

Las variables que pueden ser manipuladas en este proceso, son la velocidad de los mezcladores y los flujos de ingreso a los mismos, los cuales permiten controlar variables como la concentración del mineral de salida.

La purificación se realiza mediante la electro-obtención, ya sea, purificando directamente el producto de la lixiviación, o considerando etapas de precipitación iónica o reducción electroquímica.

2.4 Proceso de Electro-Obtención.

El proceso de electro-obtención consiste básicamente en la transformación electroquímica del metal disuelto en un electrolito en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la utilización de energía eléctrica proveniente de una fuente externa. El electrolito se deposita selectivamente sobre la superficie del cátodo mientras el agua se descompone en oxígeno y ácido sulfúrico en la superficie de ánodos insolubles de plomo.

El electrolito rico que contiene el mineral a extraer es transportado a la nave de electro-obtención, la cual consiste en un cierto número de celdas de electro-obtención que corresponden a estanques rectangulares de concreto polímero donde está la solución.

Estas celdas alternan un ánodo y un cátodo, y están conectadas conformando un circuito por el que se hace transitar una corriente eléctrica continua de muy baja intensidad, la que entra por los ánodos y sale por los cátodos. De esta forma, en el circuito los ánodos hacen las veces de polo positivo y los cátodos actúan como polo negativo.

El cobre en solución (catión, de carga positiva) es atraído por el polo negativo, pegándose partícula por partícula en la superficie del cátodo en forma metálica (carga cero), ver Figura 2-7.

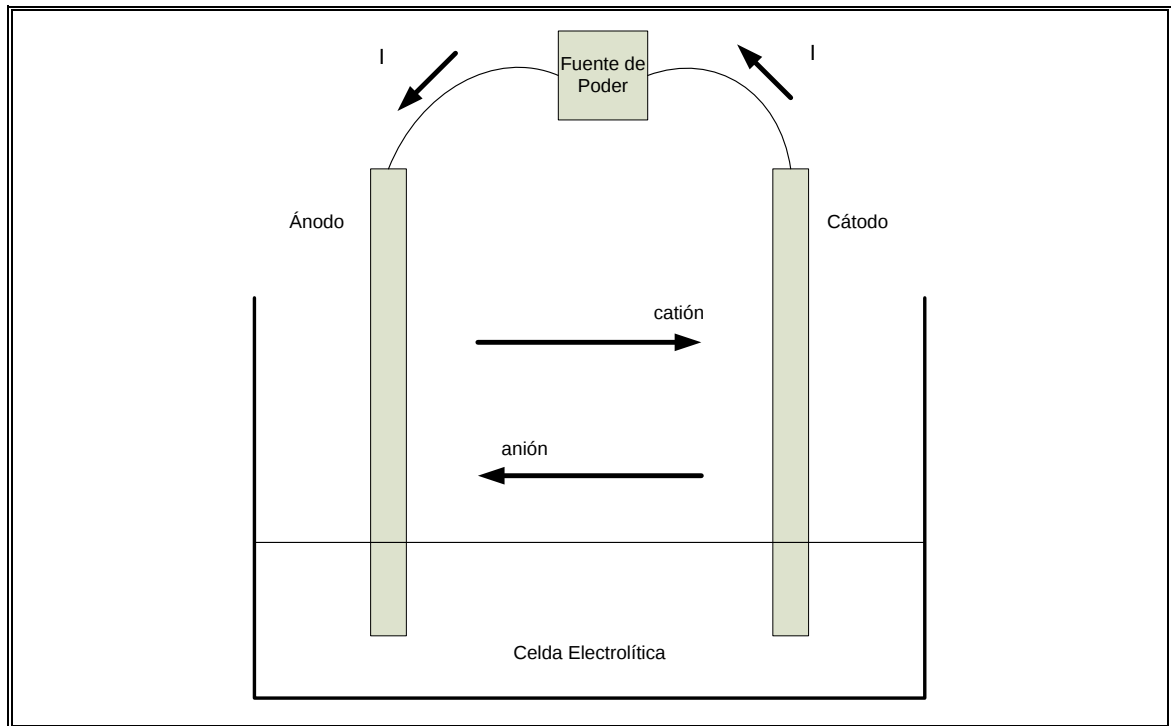


Figura 2-7: Esquema del proceso de electro-obtención.

3. MODELO FENOMENOLÓGICO DEL PROCESO DE AGLOMERACIÓN.

Para la construcción del simulador fenomenológico del proceso de aglomeración se realizó previamente un estudio detallado del proceso en sí. Posteriormente, se recopiló información revisando el estado del arte de los modelos estudiados anteriormente y que se encuentran a disposición, optándose finalmente por un modelo que se adecúa a los objetivos y requerimientos del simulador. Estos puntos se analizarán en el presente capítulo.

3.1 Estudio del Proceso de Aglomeración.

La aglomeración es un proceso en el cual pequeñas partículas se unen debido a la adición de un líquido aglomerante en un sistema agitado tal como un tambor rotatorio o un disco. De esta unión de partículas se extraen los glómeros, originados por la aglomeración en dicho tambor (Collao, 2006).

La aglomeración ofrece mejoras en las propiedades del flujo, reduce la cantidad de polvo en las partículas, mejora la permeabilidad y la resistencia mecánica, mejora el manejo del material e incrementa la densidad aparente.

La evolución de la distribución de tamaño en el proceso de aglomeración es controlada por varios mecanismos. Estos incluyen la nucleación de polvos finos, que consiste en la unión casi simultánea de varias partículas pequeñas o primarias para formar gránulos pequeños o núcleos, la coalescencia de gránulos existentes, que consiste en la unión de dos partículas de tamaño considerable y relativamente

semejantes, y finalmente el mecanismo de “layering” que facilita la formación de capas de partículas finas sobre gránulos existentes o núcleos, es decir, la unión de partículas pequeñas a una más grande. Simultáneamente, los gránulos pueden ser compactados por consolidación o reducción de tamaño por rotura (Ivenson et al, 2001). Muchos investigadores consideran la nucleación y el “layering” como casos especiales de la coalescencia por lo que proponen un mismo modelo, elaborado para coalescencia, para describir los tres mecanismos.

El curado ácido consiste en la adición de ácido sulfúrico en el lecho de lixiviación o en la aglomeración. Una de las aplicaciones es la lixiviación férrica en botaderos o “in-situ” de los minerales sulfurados de cobre, donde la adición de ácido sulfúrico sirve para regenerar el lixivante (ión férrico) y así “activar” la lixiviación (Domic, 2001).

En el caso específico de la producción de cobre, el curado y la aglomeración se realizan simultáneamente en un tambor rotatorio, en general continuo. Se utiliza una mezcla de agua y ácido sulfúrico, siendo la cantidad de ácido estimada a partir de pruebas de consumo de ácido del mineral. En este contexto, desde un punto de vista operacional es importante estudiar el efecto de la cantidad de finos, el nivel de saturación de líquido y la distribución de tamaño inicial de las partículas para el proceso de aglomeración.

El proceso de aglomeración en general tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación, de manera de asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

Para que se realice una buena aglomeración en los minerales de cobre, se deben considerar ciertas características del material mineralizado, entre las que se tiene el tamaño y la geometría de las partículas, granulometría, características geológicas, ley de cobre en el yacimiento, condiciones ambientales, evaporación del agua y humedad del curado, tiempo de curado, entre otras.

En términos generales, para una buena aglomeración es recomendable que:

- La adición del o los aglomerantes se realice sobre el mineral relativamente seco.
- La mezcla entre mineral y aglomerantes sea lo más eficiente posible.
- La cantidad de líquido o de solución sea la necesaria para alcanzar la humedad óptima de aglomeración.
- Se considere un cierto tiempo de reposo o curado, antes de proceder a la lixiviación. A mayor cantidad de finos, se necesitarán más aglomerantes y más tiempo de curado. Como mínimo debe existir un período de reposo de unas 24 horas.

La aglomeración se puede efectuar tanto en un medio ácido como en un medio alcalino.

Un factor crítico no suficientemente investigado es la permeabilidad. Esta es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones), finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos (Collao, 2004).

En proporciones del 10-20% de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida.

De esta forma, una proporción inadecuada de finos puede influir en aumentar innecesariamente el tiempo de lixiviación y con ello aumentar el consumo de reactivos, provocando una menor extracción de soluciones mineralizadas y hasta hacer que un proyecto sea inviable (Marin, 2007).

Existen distintas formas de realizar la aglomeración siendo la más utilizada la aglomeración por humedad, consistente en humedecer el material con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los gruesos.

El procedimiento para lograr la aglomeración por humedad es el riego, el que puede efectuarse de la siguiente manera:

- Sobre las transferencias de las cintas que transportan el mineral a la pila, con la dificultad de mojar la correa.
- Al caer el material de la cinta en la formación de la pila.
- Adaptando el riego a los tamaños más gruesos (mayor desviación en la caída) la aglomeración puede ser más selectiva.

Aún cuando hay operaciones que agregan el agua y el ácido directamente sobre el mineral en una correa, esta práctica no resuelve el problema de lograr una buena mezcla y aglomerar en forma homogénea las partículas más finas en torno a las más gruesas, lo cual puede conseguirse en forma muy eficiente si se rotan las partículas húmedas en torno a sí mismas, lo que permite actuar a las fuerzas cohesivas de tensión superficial, correspondientes a los estados de cohesión.

El mejor equipo para lograr estos efectos, de mezcla y de aglomeración, es el tambor aglomerador. Éste consiste en un cilindro metálico revestido interiormente con neopreno o goma antiácida provisto de levantadores para lograr una acción de rodado más efectiva de la carga, e incluyendo en el centro las tuberías perforadas para el suministro del agua, siempre agregada primero, para humedecer el mineral, y luego, algo más al interior del tambor, para el suministro del ácido con concentrado, tal como se muestra en la figura 3-1.

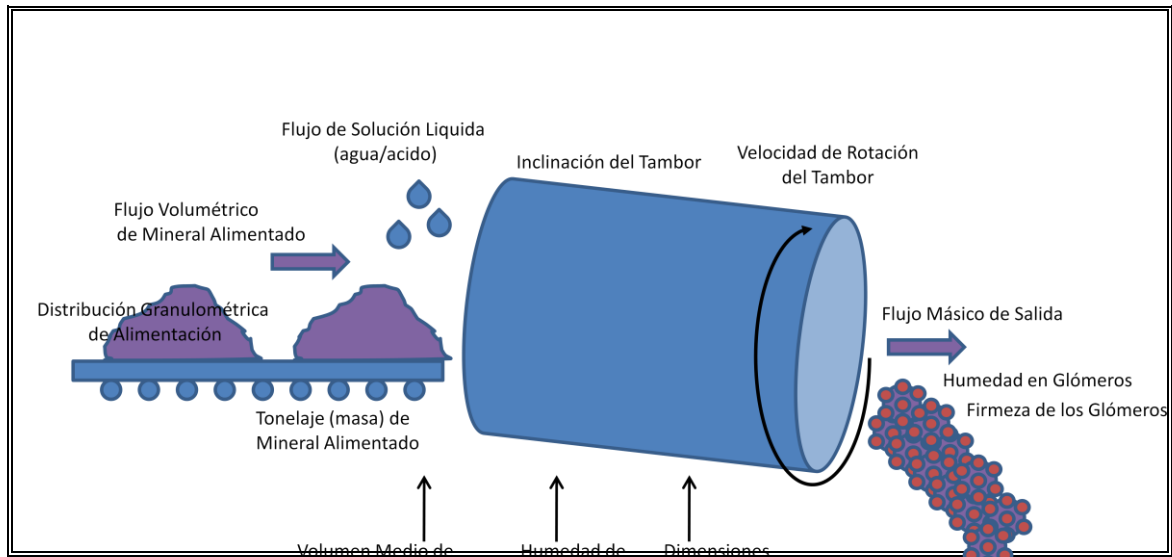


Figura 3-1: Esquema del tambor aglomerador.

La tabla 3-I presenta los sistemas de aglomeración más comunes, los minerales que habitualmente son procesados por vía hidrometalúrgica (oro, plata, cobre, uranio), así como la granulometría que pueden contener los diferentes sistemas de aglomeración que se aplican y los aglomerantes que se utilizan.

Tabla 3-I: Sistemas de aglomeración comunes (Fuente: Cisternas, 2010)

Tipo de mineral	Granulometria	Sistema de Aglomeracion	Aglomerante
Oro y Plata	Gruesa (15 mm. o similar)	Sistema de cinta simple con descarga en pila o deposito de lixiviacion	Solucion de cal
Oro y Plata	Fina (15 mm. o menos)	Sistema de tres cintas.	Cal
Oro y Plata	Gruesa (15 mm. o similar)	Sistema de tres cintas en cascada y barras mezcladoras.	Cemento y cal
Cobre - Uranio	Gruesa (15 mm. o similar)	Sistema simple de cinta transportadora.	Acido sulfúrico
Cobre - Uranio	Fina (15 mm. o similar)	Tambor rotatorio.	Acido sulfúrico

En este trabajo, y según los modelos estudiados, se eligió como sistema de aglomeración el tambor rotatorio, por lo cual se aplica ácido sulfúrico como aglomerante.

3.2 Modelamiento - Estado del Arte.

Se estudiaron tres modelos del proceso de aglomeración que utilizan balance poblacional para describir el proceso de aglomeración. Los modelos corresponden a ecuaciones no lineales integro-diferenciales que describen la tasa de variación de partículas en función de los términos de nacimiento y muerte de las mismas. La ecuación se plantea para un intervalo uniforme de partículas, por lo que la distribución de tamaños se discretiza en intervalos de tamaño uniformes.

Entre los trabajos analizados destacan los de Collao (2004, 2006), los que se basan en un modelo, en el que se aplica un sistema “batch” (Collao, 2006) y el otro, continuo (Collao, 2004). El balance poblacional continuo describe la evolución en

el tiempo de la distribución de tamaño de las partículas en un tambor aglomerador. Requiere de dos parámetros, el diámetro crítico y el *kernel* de coalescencia, los que se estiman mediante expresiones *ad-hoc*.

El balance poblacional se basa en los trabajos de Hounslow et al. (1988) y Lister et al. (1995), los cuales tienen como supuesto que la aglomeración sólo produce crecimiento de los glómeros y que estos no se rompen.

Para la estimación del diámetro crítico y el *kernel* de coalescencia, se asume que ambos dependen de la porosidad de los glómeros y el grado de humedad (o saturación de los glómeros).

Para estimar el *kernel* de coalescencia se considera el estudio de Adetayo et al (1995), el cual establece que la coalescencia (unión entre partículas) será exitosa si el diámetro promedio que alcanza el aglomerado es mayor que cierto diámetro crítico.

En el trabajo presentado por Hogg (1992), se utiliza también el balance poblacional para describir la formación de partículas en el proceso de aglomeración. El único parámetro de esta ecuación es la constante de velocidad efectiva, la cual depende de los volúmenes de las dos partículas que interaccionan.

Para resolver el modelo se discretizan los términos de nacimiento y muerte.

Por otro lado, la discretización de la distribución de tamaño de las partículas se lleva a cabo de acuerdo a una progresión lineal, lo cual tiene la desventaja que se debe especificar un gran número de intervalos de tamaño. Para solucionar lo anterior, se modificó el balance poblacional discretizado, utilizando el supuesto de

que la aglomeración se forma a partir de partículas coalescentes. Así, se logró reducir la cantidad de intervalos, permitiendo utilizar intervalos de tamaños no lineales, por ejemplo geométricos.

En el trabajo de Hogg (1992), se muestran dos tipos de soluciones: una analítica y otra numérica. En la solución analítica, se definen dos tipos de aglomeración correspondientes a sistemas diluidos de partículas dispersas y sistemas concentrados de partículas en contacto. Para cada caso, Hogg (1992) soluciona el modelo de balance poblacional original, expresando el total de aglomerados en función del tiempo, considerando como supuesto que la velocidad efectiva es constante e independiente del tamaño de las partículas que interaccionan. Para la solución numérica, se presentan las relaciones que se utilizan para resolver la ecuación de balance poblacional modificado, la que considera que el aglomerado se forma a partir de partículas no coalescentes.

En el mismo trabajo se estudia una solución analítica aproximada, también bajo el supuesto de velocidad efectiva constante, para los dos casos de coagulación en el proceso.

La principal diferencia de este modelo en comparación con el presentado por Collao (2006) es que el modelo está limitado a la aglomeración de partículas sólidas rígidas, principalmente a la formación de aglomerados porosos.

Otro trabajo analizado es el de Wang et al. (2006), cuyo modelo incluye, de la misma manera que los anteriormente vistos, ecuaciones para describir el balance poblacional, con términos de nacimiento y muerte de las partículas. Además,

considera el número de partículas contenidas en la operación, el cual se discretiza para solucionar la ecuación.

En la investigación de Collao (2006) el modelo se calibra usando resultados experimentales obtenidos de un tambor de aglomeración “batch” de escala laboratorio (cuyas dimensiones están mencionadas en el punto 4.3). En el mencionado trabajo, se hicieron experimentos en los que se variaba la cantidad de finos y la humedad con el fin de estudiar estos efectos. Para cada experimento se comparó la distribución de tamaño de los glómeros de la simulación con la distribución real y se estimó el diámetro crítico y el *kernel* de coalescencia. Los tiempos de residencia en cada experiencia fueron de 2.4, 7 y 20 minutos, donde el primero corresponde al tiempo escalado que se utilizaría en un tambor a nivel industrial que opera en forma continua (1 min).

También se estudió en forma cualitativa, a partir de las experiencias de laboratorio, cómo afectaba el grado de humedad y el contenido de finos en el comportamiento de los aglomerados. Se encontró que el diámetro crítico y el *kernel* de coalescencia aumentan con la saturación líquida. Si el contenido de finos aumenta, el efecto es leve comparado con la saturación líquida.

El trabajo presentado por Hogg et al. (1992), en cambio, no incluye validación experimental para ninguno de los dos tipos de soluciones. Sin embargo ofrece modelos para varios tipos de aglomeradores.

El modelo de Wang (2006), por su parte, considera un tambor aglomerador piloto con parámetros definidos para su calibración a través de pruebas experimentales.

De los diferentes trabajos presentados y analizados, se estimó conveniente seleccionar el modelo continuo propuesto por Wang et al. (2006), ya que el modelo fue desarrollado con el objetivo de poder controlar el proceso de aglomeración.

El modelo incluye como variable de control el *kernel* de coalescencia como una función de la humedad contenida, e incorpora variables como la profundidad del lecho y la velocidad de giro del tambor.

En el capítulo siguiente se profundizará en el modelo matemático del proceso.

3.3 Modelo Dinámico.

De acuerdo al modelo dinámico propuesto por Wang et al. (2006), es posible identificar las distintas variables de entrada, variables de salida y parámetros:

Las variables de entrada son:

- Flujo másico de mineral alimentado.
- Flujo de solución líquida (agua/ácido).
- Distribución granulométrica de alimentación.

Las variables de salida son:

- Distribución granulométrica de los glómeros.
- Flujo másico de salida.
- Humedad en los glómeros.

Como parámetros se consideran:

- Diámetro medio de partículas de entrada.

- Dimensiones del tambor.
- Inclinação del tambor.
- Humedad de entrada del mineral.

La Figura 3-2 muestra las diferentes variables y parámetros del proceso:

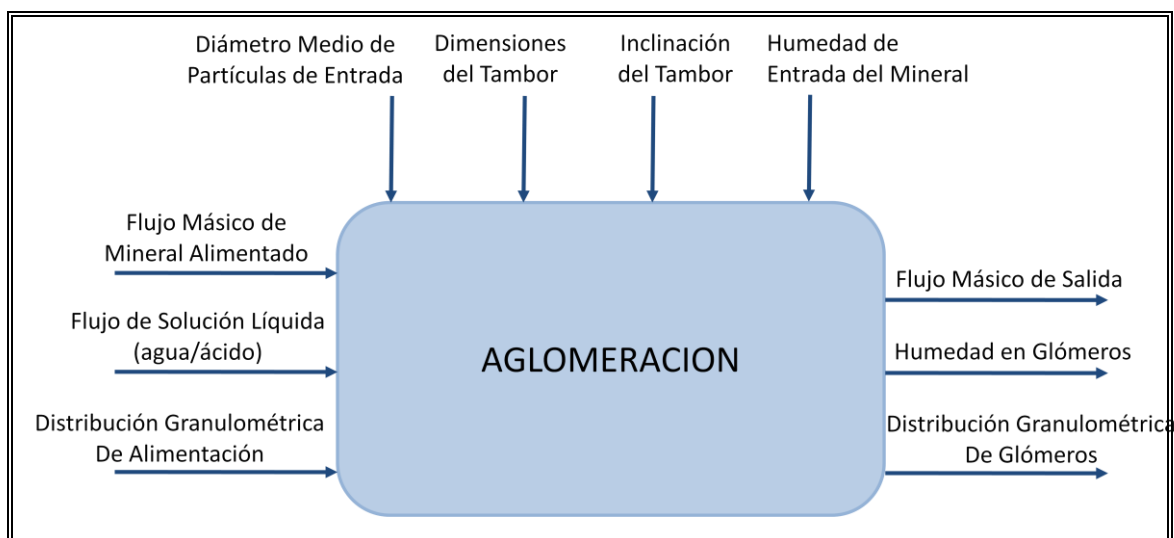


Figura 3-2: Variables y parámetros del proceso de aglomeración.

La ecuación para el balance de población en el modelo continuo propuesto por Wang et al. (2006) está dado por:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(L, t) = -\frac{\partial}{\partial L} [Gn(L, t)] + B(L, t) - D(L, t) + F^{in} f^{in}(L, t) - F^{out} f^{out}(L, t) \quad (3.1)$$

En el lado derecho de la ecuación se pueden apreciar cinco términos, de los cuales el primer término G indica la tasa de crecimiento de las partículas y donde n representa el número de partículas, dependiente del diámetro de las partículas L y del tiempo. A este término se suma y resta respectivamente la tasa de nacimiento de partículas, representada por B en el segundo término y la tasa de muerte, representada por D en el tercer término.

En los términos cuatro y cinco aparecen el flujo F de la mezcla de mineral y solución acuosa (denominado flujo másico) y la distribución f de tamaño tanto de entrada como de salida (*in, out* respectivamente).

Las tasas de nacimiento y muerte de las partículas respectivamente, se definen de la siguiente manera:

$$B(L, t) = \frac{L^2}{2} \int_0^L \frac{\beta \left[(L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}, \lambda \right] n \left[(L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}, t \right] n(\lambda, t)}{(L^3 - \lambda^3)^{\frac{2}{3}}} d\lambda \quad (3.2)$$

$$D(L, t) = n(L, t) \int_0^\infty \beta(L, \lambda) n(\lambda, t) d\lambda \quad (3.3)$$

Donde β indica el *kernel* de coalescencia. L representa el diámetro de las partículas y λ es una variable de integración.

Estas expresiones se discretizan empleando un método geométrico propuesto en Hounslow et al. (1988), en el cual se aproxima el modelo continuo en base a un número finito de variables básicas.

Independizando las partes en función del *kernel* de coalescencia, se obtiene una ecuación diferencial ordinaria de la forma:

$$\frac{d}{dt} N_i = -\frac{\partial}{\partial L} (G N_i) + B_i - D_i + F^{in} \frac{N_i^{in}}{N_t^{in}} - F^{out} \frac{N_i^{out}}{N_t^{out}}; \quad i = 1, 2, 3 \dots i_{max} \quad (3.4)$$

Donde el subíndice t indica el valor total, *in-out* indican la entrada y salida de las corrientes. Las expresiones de nacimiento, muerte y tasa de crecimiento, discretizadas, vienen dadas respectivamente por:

$$B_i = N_{i-1} \sum_{j=1}^{i-2} (2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_j) + \frac{i}{2} \beta_{i-1,j-1} N_{i-1}^2 \quad (3.5)$$

$$D_i = N_i \sum_{j=1}^{i-1} (2^{j-i} \beta_{i,j} N_j) - N_i \sum_{j=1}^{i_{max}} (\beta_{i,j} N_j) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial G N_i}{\partial L} = -\frac{2G}{(1+r)L_i} * \left(\frac{r}{r^2-1} N_{i-1} + N_i - \frac{r}{r^2-1} N_{i+1} \right) \quad (3.7)$$

El método de discretización presenta dos limitaciones:

- Puede conducir a un error significativo en clases de gran tamaño.
- El tratamiento del término de la tasa de crecimiento es demasiado simple para evitar la dispersión numérica.

Por lo tanto cuando el número de partículas es muy grande y los diámetros muy pequeños es conveniente pasar del balance de distribución al balance de masas, definiendo el diámetro medio:

$$M_i = \frac{1}{6} N_i \pi \rho L^3 \quad (3.8)$$

Donde M_i es la masa en kg de la clase i y ρ es la densidad de la partícula en kg/m^3 .

De esta forma obtenemos:

$$\frac{d}{dt} M_i = -L_i^3 \frac{\partial}{\partial L} \left(G \frac{M_i}{L_i^3} \right) + B_{m_i} - D_{m_i} + F_m^{in} \frac{M_i^{in}}{M_t^{in}} - F_m^{in} \frac{M_i}{M_t}; \quad i = 1, 2, 3 \dots i_{max} \quad (3.10)$$

donde M_t es la masa total.

La tasa de nacimiento de partículas está dada por:

$$B_{m_i} = L_i^3 \left[M_{m_{i-1}} \sum_{j=1}^{i-2} (2^{j-i+1} \beta_{m_{i-1},j} M_{m_j}) + \frac{i}{2} \beta_{m_{i-1},i-1} M_{m_{i-1}}^2 \right] \quad (3.11)$$

A su vez, la tasa de muerte de partículas esta dada por:

$$D_{m_i} = L_i^3 \left[M_{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} (2^{j-i} \beta_{m_i,j}) - M_{m_i} \sum_{j=1}^{i_{max}} \beta_{m_{i-1},i-1} M_{m_{i-1}}^2 \right] \quad (3.12)$$

La tasa de crecimiento de la masa está dada por:

$$L_i^3 \frac{\partial \left(G \frac{M_i}{L_i^3} \right)}{\partial L} = - \frac{2GL_i^2}{(1+r)} \left(\frac{r}{r^2-1} \frac{M_{i-1}}{L_{i-1}^3} + \frac{M_i}{L_i^3} - \frac{r}{r^2-1} \frac{M_{i+1}}{L_{i+1}^3} \right) \quad (3.13)$$

donde $r = \frac{L_{i+1}}{L_1} = \sqrt[3]{2}$; $i = 1, 2, 3 \dots i_{max}$

Por otra parte el *kernel* de coalescencia es una variable importante dentro de la distribución granulométrica, ya que establece la simetría con respecto a los volúmenes de las partículas.

Por tal motivo se incorporan también al modelo, el *kernel* de coalescencia en función de la humedad, la profundidad del lecho y la velocidad de giro del tambor.

Por esto en la formulación se emplean dos modelos de *kernel*, llamados tamaño independiente del *kernel* y tamaño dependiente del *kernel*, dados respectivamente por:

$$\beta_0 = a_0 [(x_w)^{n_1} e^{-a_1 x_w}] [(B_d)^{n_2} e^{-a_2 B_d}] (S_d^{n_3} e^{-a_3 S_d}) \quad (3.14)$$

$$\beta_{m_0} = \frac{6.0 \cdot 10^9}{\pi \rho} \beta_0 \quad (3.15)$$

Donde x_w representa la humedad que las partículas contienen, B_d es la profundidad del lecho, S_d es la velocidad de giro del tambor, $a_0 - a_3$ y $n_1 - n_3$ son las constantes determinadas a través de técnicas de identificación de parámetros basados en datos medidos y experimentos prácticos realizados.

La formación de los glómeros depende principalmente del balance líquido que pueda contener, el cual viene dado por la ecuación:

$$\frac{dX_w}{dt} = \frac{1}{M_t} [F_m^{in} X_m^{in} - F_m X_w + R_w] \quad (3.16)$$

Donde F_m^{in} y F_m son, respectivamente, los flujos másicos de entrada y salida. R_w es la tasa de rociado de la solución.

4. DESARROLLO Y PRUEBA DEL SIMULADOR.

El simulador fue desarrollado en plataforma MATLAB, debido a las prestaciones que ésta tiene para realizar las simulaciones e incorporar estrategias de control, además de su versatilidad. A continuación se justifica con mayores antecedentes la elección de esta plataforma y el desarrollo del simulador en dicha plataforma.

4.1 Análisis de Plataformas Disponibles.

Entre las plataformas disponibles para el desarrollo del simulador podemos citar distintas herramientas como MATLAB, UNISIM, COMSOL y ARENA entre otros.

MATLAB es una herramienta educativa que ha pasado de dar apoyo en cursos relacionados con Teoría de Matrices a convertirse en una poderosa herramienta tanto en el ámbito educativo como en el industrial.

A nivel industrial, existe una gran cantidad de aplicaciones desarrolladas en MATLAB orientados a muchos problemas prácticos de ingeniería y matemáticas. Es utilizado en geofísica, en el diseño de sistemas de control, en procesamiento de señales, en inteligencia artificial y redes neuronales, en simulación de sistemas dinámicos, en optimización, en problemas de modelación, sistemas dinámicos, etc.

UNISIM de Honeywell, es una plataforma de simulación a nivel industrial que permite plantear modelos dinámicos y en estado estacionario para estudiar el diseño de plantas, evaluar rendimiento y solucionar problemas de planificación operativa, comercial y de gestión de activos.

COMSOL Multiphysics es una plataforma que está enfocada a la simulación de procesos multifísicos continuos para aplicaciones físicas y de ingeniería, representados por ecuaciones parciales. Presenta una interfaz a MATLAB y varios de sus “*toolboxes*” proporcionan una variedad de entornos de diseño y programación.

ARENA es un software comercializado por Rockwell Automation, diseñado para la simulación de eventos discretos, lo cual resulta conveniente el momento de realizar una simulación de tareas “batch”. La desventaja para el desarrollo del simulador del proceso de aglomeración presente en este trabajo es que no cuenta con herramientas para simulación de procesos continuos.

ASCEND es un software libre utilizado para formular modelos matemáticos mediante ecuaciones no lineales y resolver problemas de optimización lineal y no lineal, asociados a sistemas dinámicos expresados en forma de ecuaciones diferenciales/algebraicas. Un ejemplo de simulador desarrollado en la plataforma ASCEND es el simulador HYDROSIM (Cisternas et al. 2010), de la Universidad de Antofagasta, el cual incluye diferentes modelos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención. Este simulador no contempla el proceso de aglomeración ni tampoco está orientado a poder aplicar estrategias de control.

4.2 Implementación del Simulador.

El simulador, como ya se mencionó anteriormente, fue desarrollado en MATLAB, implementando las ecuaciones algebraicas y diferenciales descritas anteriormente.

Los datos de prueba introducidos al simulador, son los utilizados en el modelo propuesto por (Collao, 2006), los cuales se encuentran dentro del rango de tamaños de las partículas que se describen en el trabajo de (Wang et al, 2006), es decir de 0.25 a 20.20 mm.

El modelo considera como entradas: el tonelaje del mineral, su distribución y el flujo de la solución (agua-ácido), los cuales influyen directamente sobre la humedad.

Se desarrolló también una interfaz gráfica para que el usuario del simulador se adapte fácilmente a éste y pueda aplicarlo de manera adecuada.

Dicha interfaz se considera práctica para un operador, ya que introduciendo las variables de entrada principales, se obtiene la respuesta del simulador en forma grafica, lo que permite describir, analizar y comprender el comportamiento dinámico del proceso, realizando los cambios que se vean convenientes.

Además se puede realizar la simulación bajo una estrategia de control, ya sea PID o MPC, previo diseño del controlador, obteniendo como respuesta el control de la humedad y la respuesta del simulador bajo el sistema de control seleccionado.

4.3 Calibración del Simulador.

El modelo fue calibrado utilizando los parámetros empleados en Wang et al. (2006), los cuales fueron obtenidos en las pruebas experimentales realizadas en una planta piloto y corresponden a:

- Largo de tambor = 2.0 m.
- Diámetro del tambor = 0.3 m.
- Rango de soporte del tambor = 30.0 – 40.0 kg.
- Velocidad de rotación = 25.0 – 40.0 rpm.
- Rango de tiempo de retención = 6.0 – 10.0 min.
- Rango de tamaño de las partículas es de 0.25 – 20.20 mm., distribuidos en 20 clases.

Otros parámetros nominales del modelo se describen en la tabla 4-I.

Tabla 4-I: Parámetros del Modelo (Fuente: Wang et al., 2006)

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
a0	$8.938 \cdot (10)^{26}$	α	1
a1	198	Gmax (mm)	0.000167
n1	19.8	Rango de L (mm)	0.250-20.16
a2	8.76	imax	20
n2	4.0	Xin	0.01
a3	40.0	Xwc	0.09
n3	3.0	w1,w2,w3	100.0,1.0,0.008
Bd (m)	0.075	ρ (kg/m ³)	1500.0
Sd (rotacion)	0.4564	β_0	$3.522 \cdot 10$
		k	0.01

A continuación se precisa la notación utilizada:

$a_0 - a_3$: Parámetros correspondientes al cálculo del *kernel* de coalescencia.

B_d :	Profundidad del lecho sólido, m .
B, B_m :	Número y masa de la tasa de nacimiento, $s^{-1}mm^{-1}, kg^{-1}mm^{-1}$.
B_i, B_{m_i} :	Número y masa de la tasa de nacimiento según la clase i , $s^{-1}mm^{-1}, kg^{-1}mm^{-1}$.
D, D_m :	Número y masa de la tasa de muerte, $s^{-1}mm^{-1}, kg^{-1}mm^{-1}$.
D, D_m :	Número y masa de la tasa de muerte, $s^{-1}mm^{-1}, kg^{-1}mm^{-1}$.
D_i, D_{m_i} :	Número y masa de la tasa de nacimiento según la clase i , $s^{-1}mm^{-1}, kg^{-1}mm^{-1}$.
f :	Función de distribución de tamaño, <i>sin dimensiones</i> .
F :	Tasa de flujo solido, kg/s
G :	Tasa de crecimiento, $mm s^{-1}$.
$k_{i,j}, km_{i,j}$:	Parámetro correspondiente al <i>kernel</i> de coalescencia, mm^{-6}
L :	Tamaño característico de las partículas, mm .
N :	Número de densidad de partícula, <i>número/mm</i> .
$n_1 - n_3$:	Parámetros correspondientes al <i>kernel</i> de coalescencia.

N_i :	Número de partículas en la clase i .
R_w :	Tasa de inyección de solución, kg/s .
S_d :	Velocidad de rotación del tambor, rpm .
T :	Tiempo variable, s .
V :	Volumen de la partícula, mm^3 .
x_w :	Humedad de las partículas, kg/kg .

4.4 Validación Cualitativa.

A continuación se presentan diversas pruebas realizadas con el simulador, las que comprueban que su comportamiento corresponde adecuadamente al del proceso estudiado.

Para las simulaciones realizadas se utilizaron los datos experimentales de Collao, (2006), los cuales se discretizaron, obteniéndose la distribución de tamaños de los glómeros de entrada.

Las pruebas incluyen variaciones en los flujos másicos de entrada, flujos volumétricos (agua/ácido) de entrada, el flujo másico de mineral alimentado, y la velocidad de rotación del tambor.

Como variables de salida se consideran el flujo másico de salida, la humedad y la distribución granulométrica de los glómeros.

La Figura 4-1 presenta el efecto de la variación en el flujo másico de entrada sobre el flujo másico de salida, apreciándose, como era de esperar, una relación directa (aumento en la salida ante aumento en la entrada, y disminución en la salida ante disminución en la entrada). Cabe recalcar que debido a que en el tambor rotatorio queda un porcentaje de pulpa es que sale menos masa de la que ingresa.

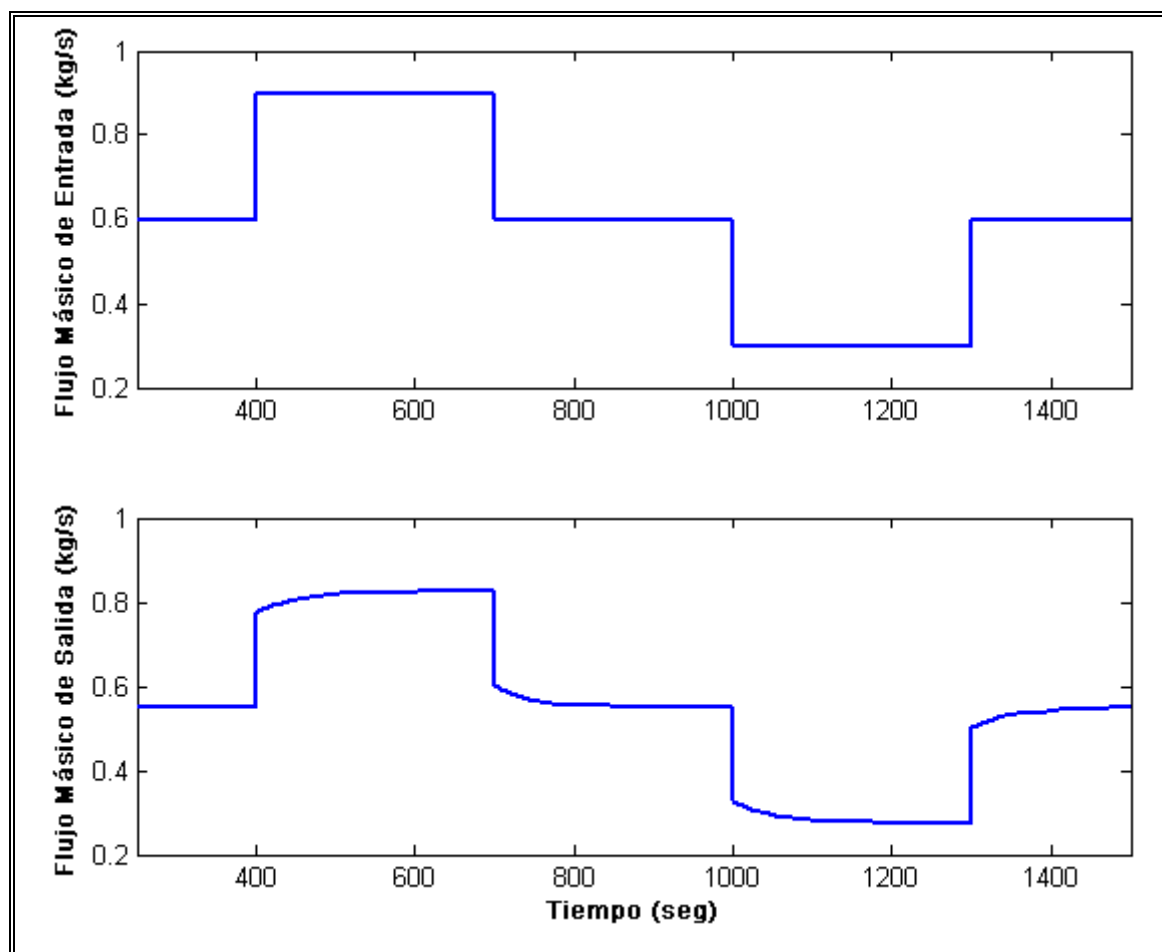


Figura 4-1: Variación del flujo másico total de salida ante variaciones del flujo másico (sólido y líquido) de entrada.

La Figura 4-2 muestra un efecto directo similar sobre la masa contenida en el tambor y sobre la humedad, al variar el flujo másico de líquido (agua/ácido), manteniendo constante el flujo másico de mineral.

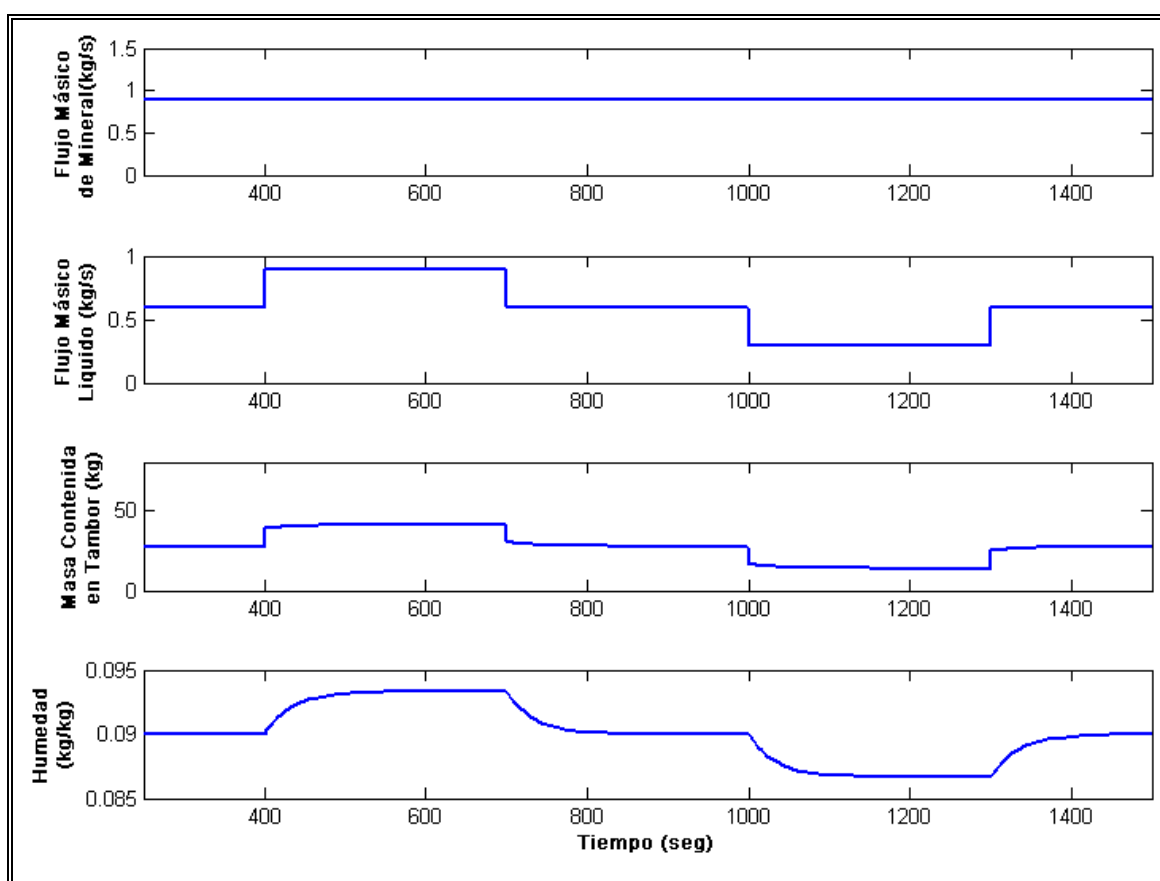


Figura 4-2: Humedad contenida en los glómeros de salida ante variación del flujo másico de líquido (agua/ácido).

La Figura 4-3 presenta la respuesta del simulador en lazo abierto, al variar el flujo másico de mineral, manteniendo constante el flujo másico de líquido. En este caso se observa, como es de esperar, un efecto directo sobre la masa contenida en el tambor, y un efecto inverso sobre la humedad de los glómeros de salida.

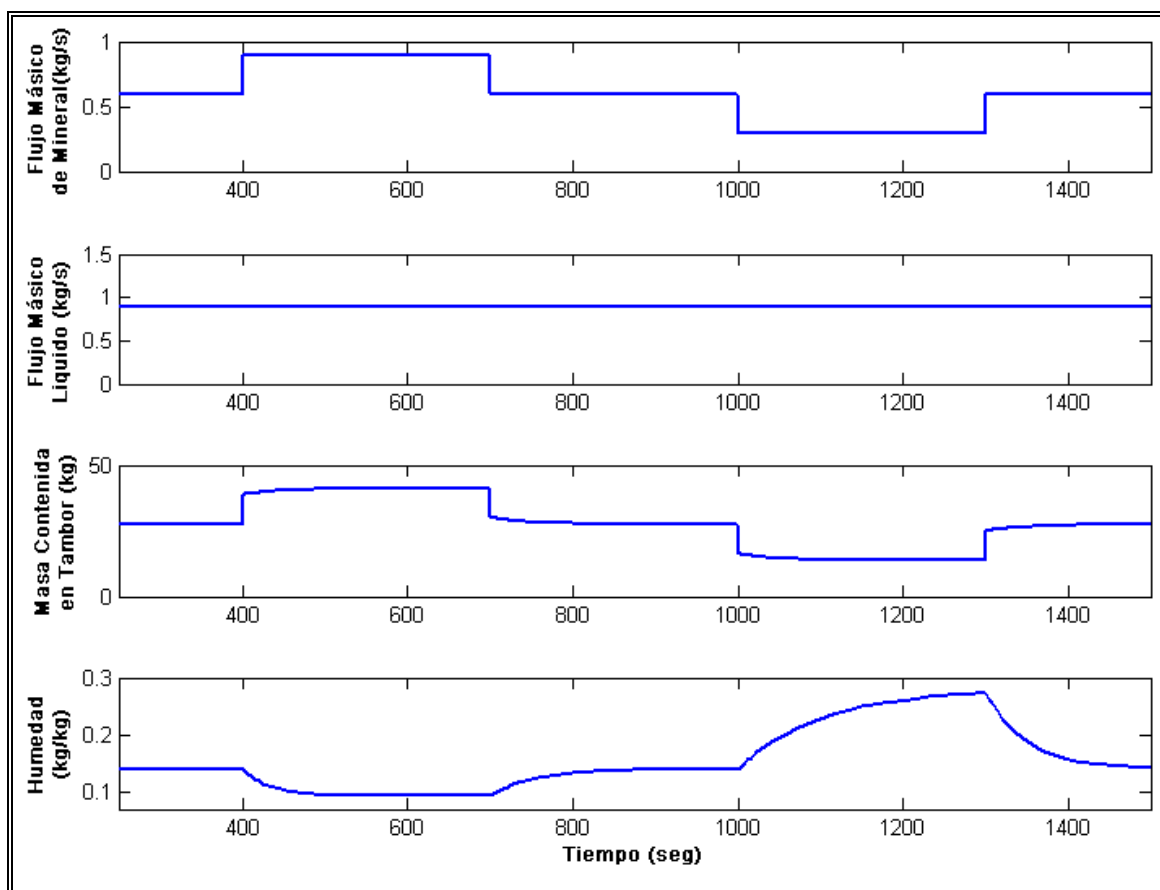


Figura 4-3: Humedad contenida en los glómeros de salida ante variación del flujo másico de mineral.

Bajo la misma concepción en cuanto al manejo de variables de entrada y parámetros de la figura 4-2, se optó por variar en este caso el flujo másico de mineral manteniendo constante el flujo másico de líquido.

Por otra parte, el tamaño de los glómeros depende de distintos factores como la distribución granulométrica de entrada, el flujo volumétrico de mineral en la alimentación y el tiempo de residencia en el tambor, pero principalmente del *kernel* de coalescencia, el cual a su vez es función de la humedad de los glómeros (Herrera, 2007).

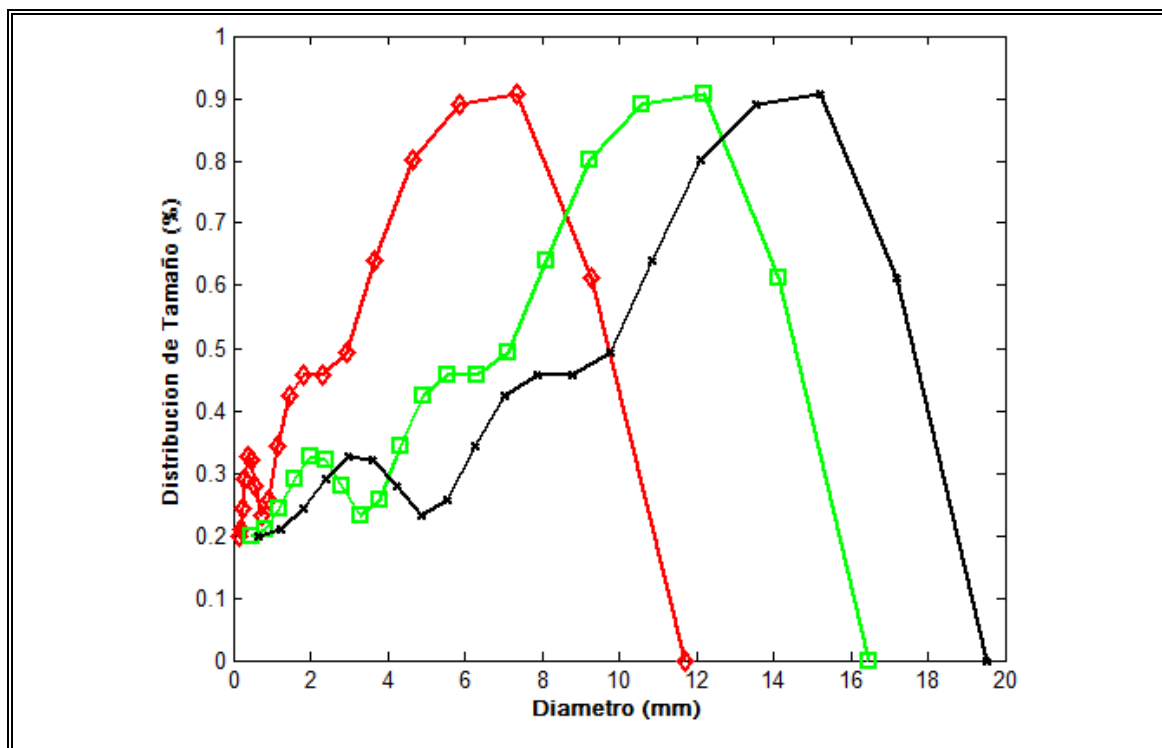


Figura 4-4: Distribución granulométrica de glómeros para diferentes valores de humedad.

La Figura 4-4 muestra esta dependencia, de acuerdo a los resultados proporcionados por el simulador.

La curva de color rojo se obtiene para una humedad alta, superior a los 0.09 kg/kg. A su vez la curva de color verde, corresponde a un valor de humedad ligeramente más bajo, 0.07 kg/kg. Finalmente, la curva de color negro se obtiene con un valor de humedad alrededor de 0.05 kg/kg lo cual indica que se han obtenido glómeros de mayor tamaño, para un mismo tiempo de residencia.

5. DISEÑO Y PRUEBAS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL.

Las pruebas de aplicación del simulador permiten evaluar diferentes estrategias de control de la humedad, que como se indicó anteriormente es una variable crítica del proceso.

En todas las pruebas realizadas, la variable manipulada es el flujo másico de líquido de entrada, ya que se considera que es la variable más apta a manipular.

5.1 Control Proporcional-Integral-Derivativo.

En primer lugar se aplicó un control clásico PID (Proporcional-Integral-Derivativo), para cuya sintonía se utilizó el método de Aström - Hägglund en lazo abierto, el cual presenta una serie de fórmulas que entrega valores óptimos para los parámetros del controlador.

El propósito del experimento es demostrar que se puede aplicar, en este caso, un control PID al simulador, aplicando cualquier método de sintonía.

La respuesta de la humedad, la variación en el tiempo del flujo másico de entrada, se observa en la Figura 5-1.

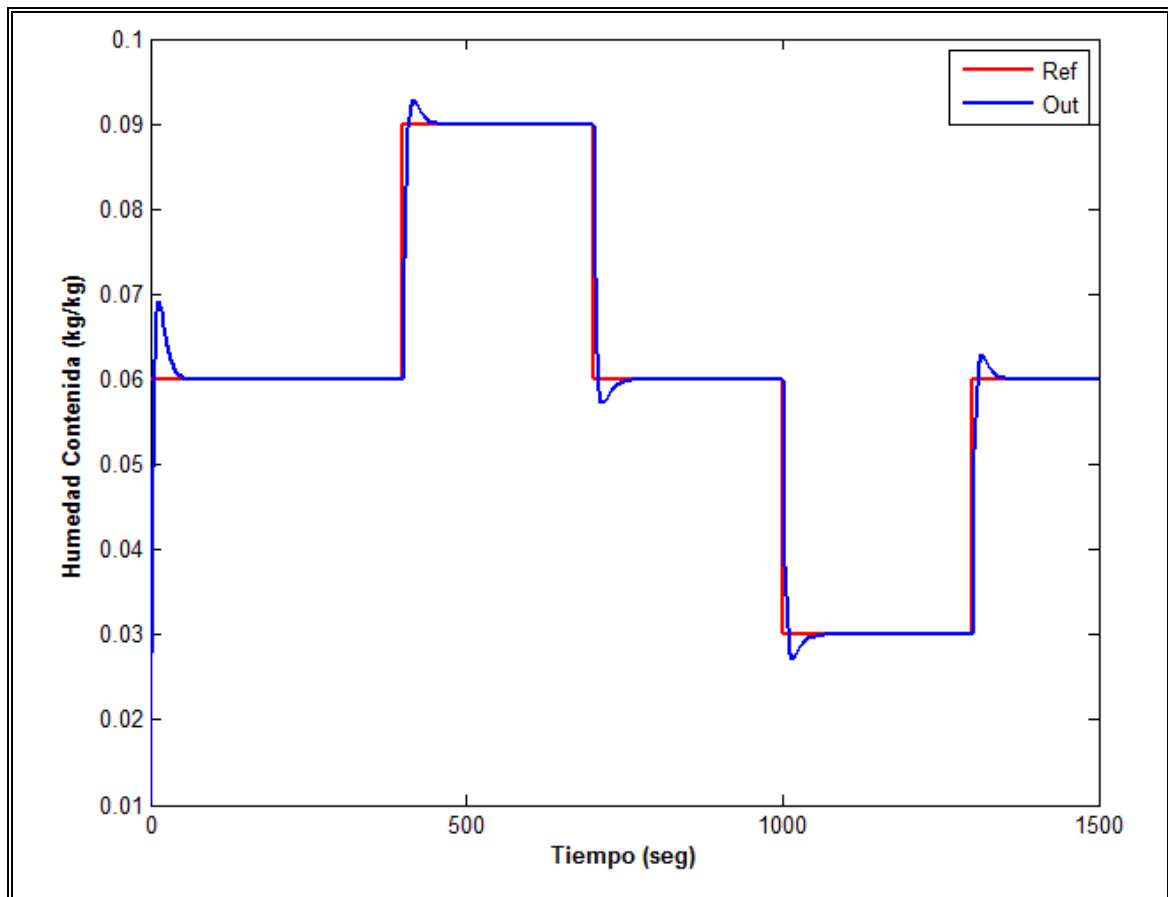


Figura 5-1: Respuesta del sistema para un controlador PID.

Aplicando una perturbación en el sistema, en este caso el incremento de la humedad de mineral de entrada, se obtiene la respuesta del controlador observada en la Figura 5-2.

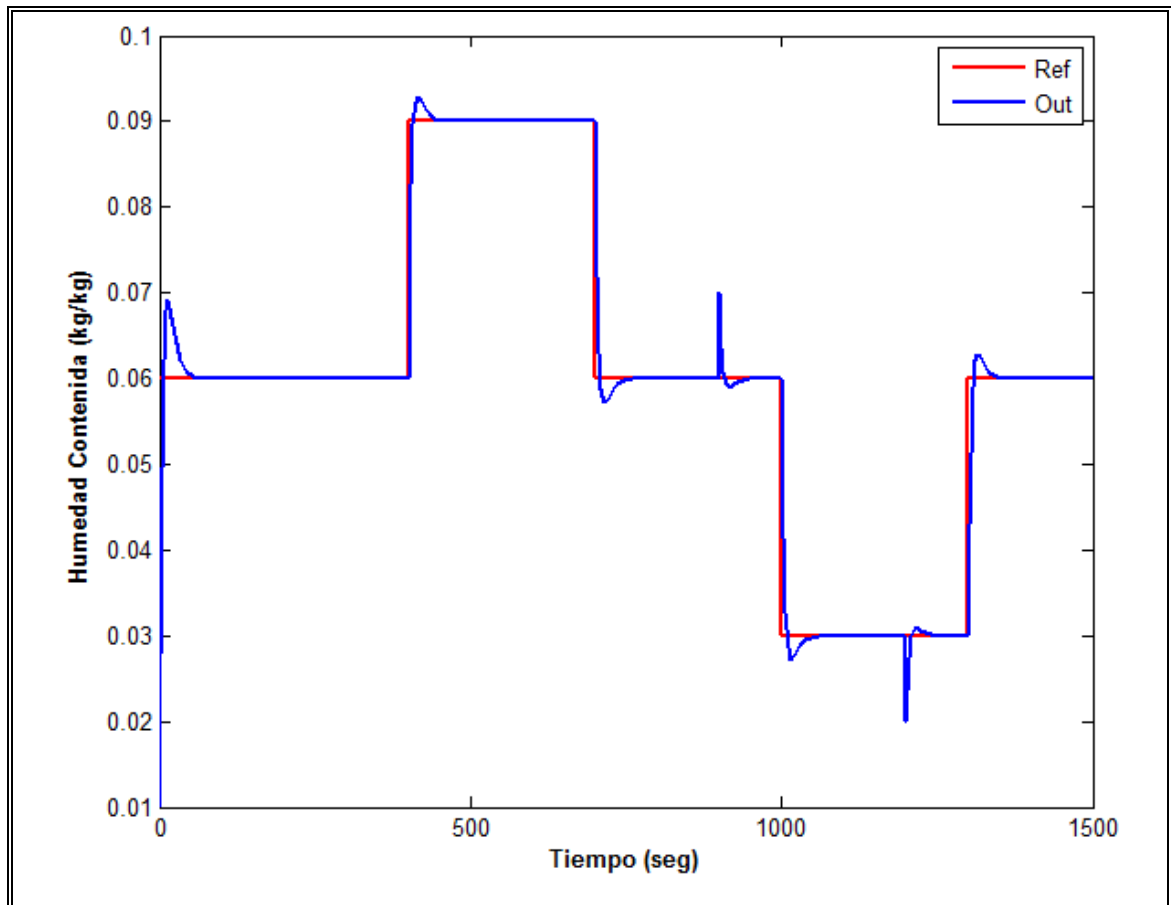


Figura 5-2: Respuesta del sistema para un controlador PID con perturbación.

5.2 Control Predictivo Basado en Modelo.

Al simulador se aplicó un control predictivo MPC (Model Predictive Control), basado en un modelo del proceso identificado en lazo abierto.

La función objetivo a minimizar está dada por:

$$J = \sum_{j=1}^{50} [w(t+j) - \hat{y}(t+j|t)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{10} [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (5.1)$$

Donde el primer termino se refiere al seguimiento de la referencia con un determinado horizonte de predicción, y el segundo término al esfuerzo de control con el respectivo horizonte de control.

Luego de distintas pruebas, el parámetro λ se fijó en un valor igual a 1.

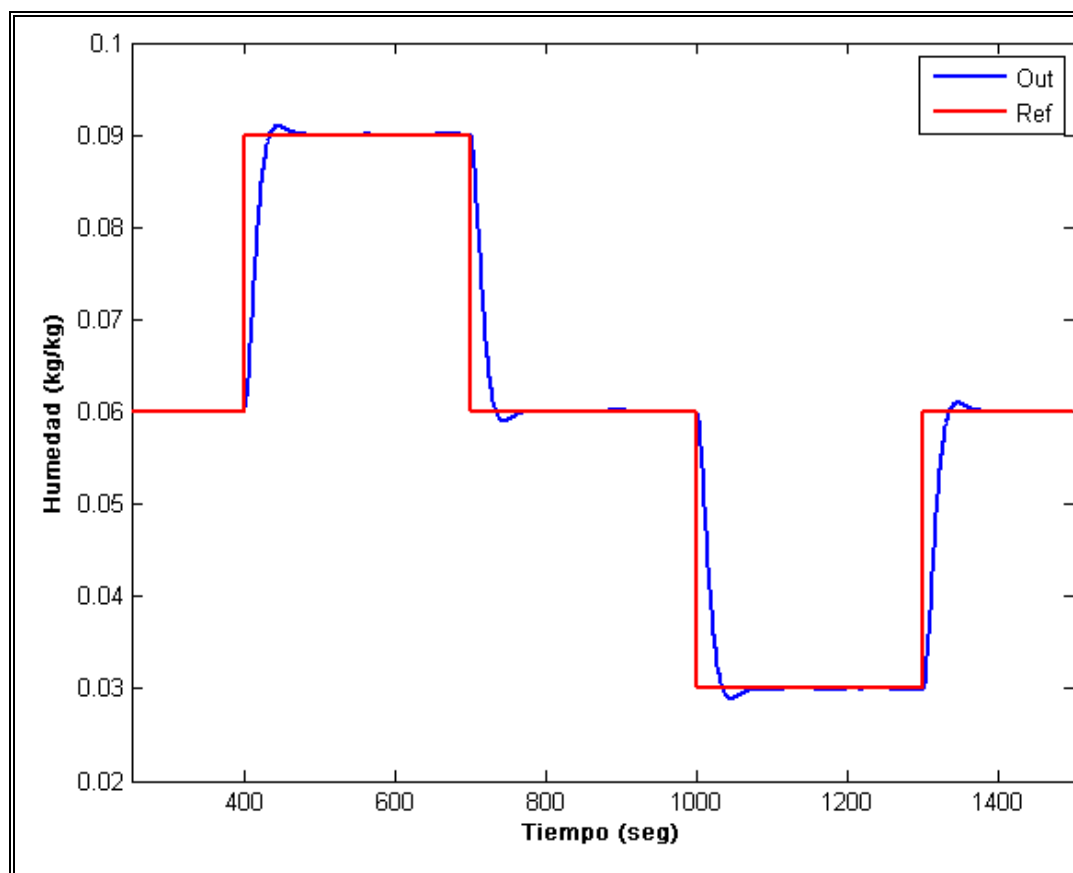


Figura 5-3: Respuesta del sistema ante un controlador MPC.

La Figura 5-3 presenta la respuesta de la humedad ante cambios de la referencia; la Figura mencionada muestra también como varía la variable manipulada, en este caso el flujo líquido (agua/ácido).

Un incremento en la humedad de entrada del mineral puede suponer una perturbación, y la respuesta del controlador ante dicha perturbación puede observarse en la Figura 5-4.

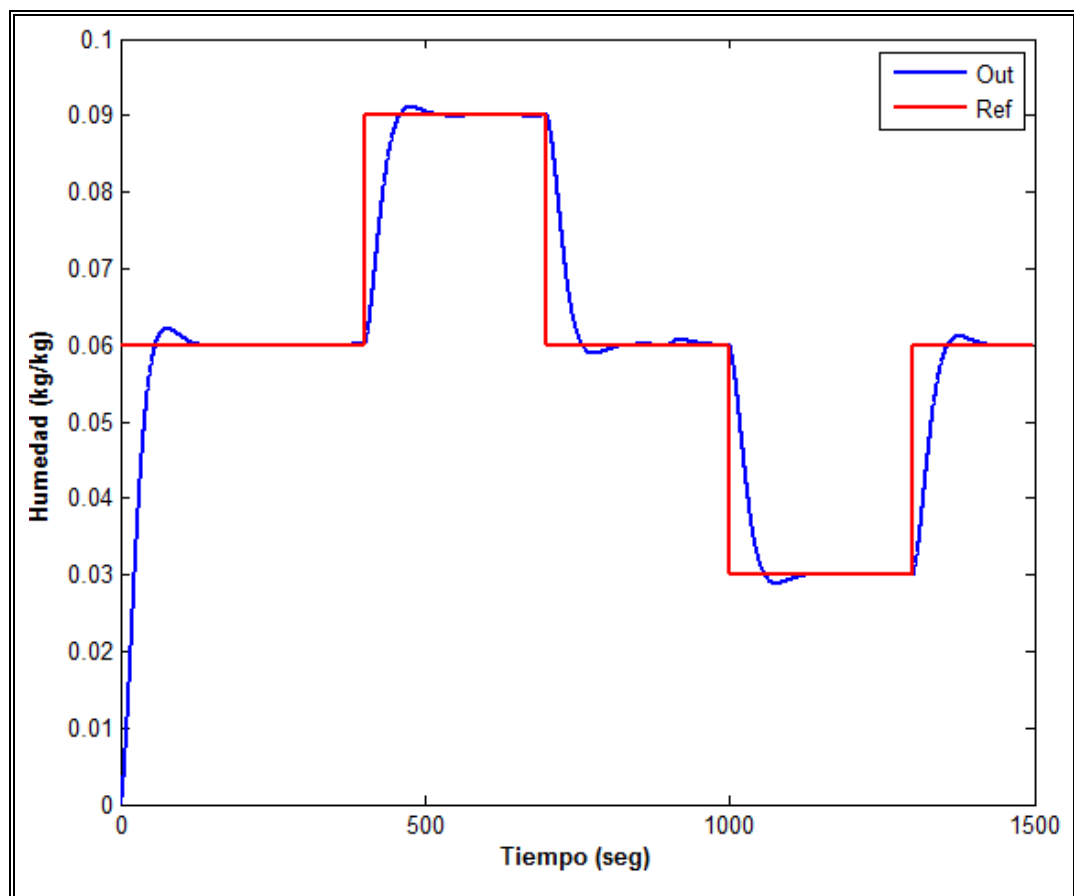


Figura 5-4: Respuesta del sistema ante un controlador MPC con perturbación.

5.3 Análisis Comparativo.

La Figura 5-3 permite comparar cualitativamente el desempeño de ambos controladores.

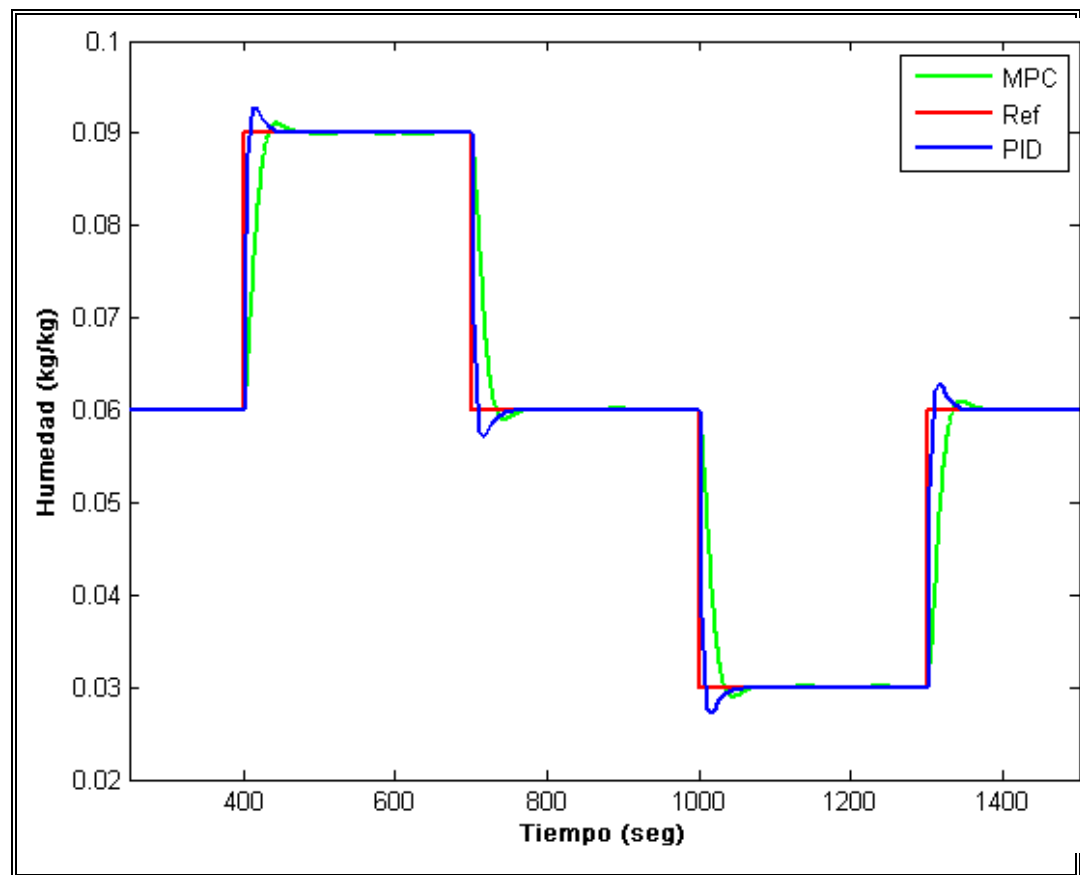


Figura 5-5: Comparación entre respuestas de controladores PID y MPC.

Más a detalle se puede observar una comparación de la respuesta de los controladores ante una perturbación en la Figura 5-6.

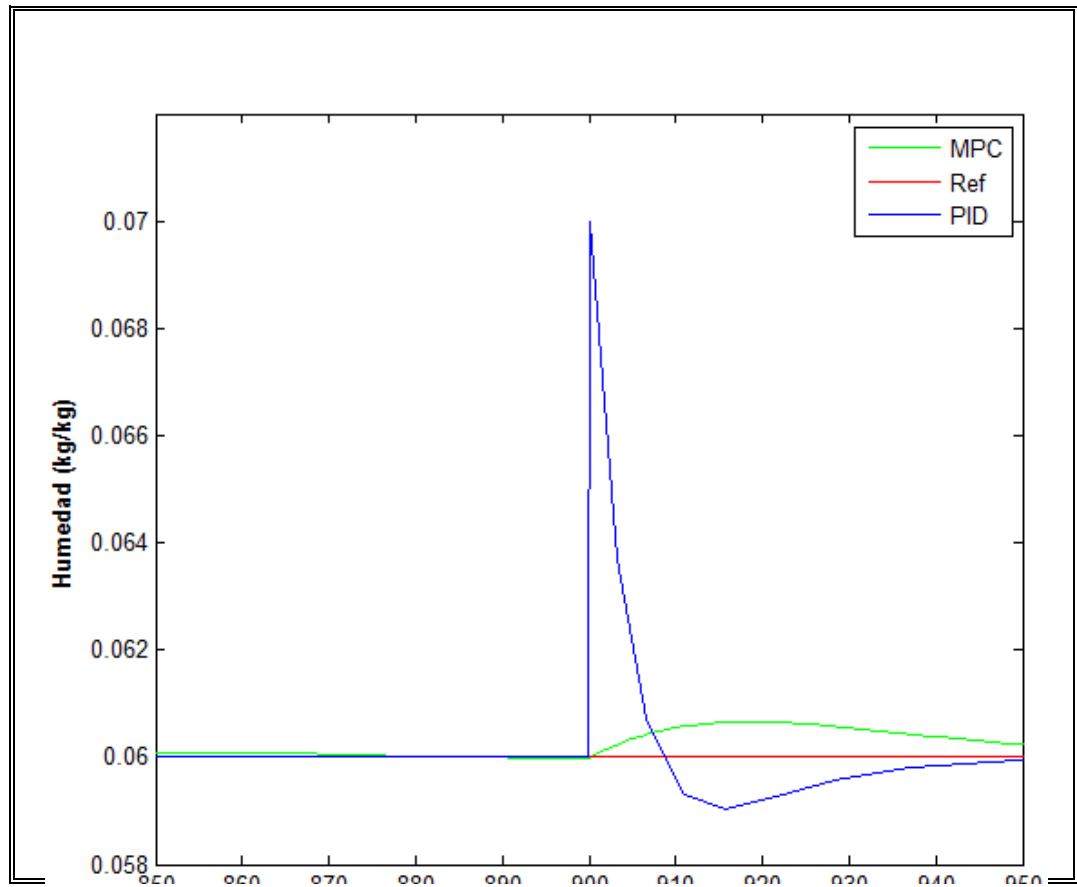


Figura 5-6: Comparación entre respuestas de controladores PID y MPC con perturbación.

Para la evaluación cuantitativa se utilizó el error RMS, ver Tabla 5-I.

Tabla 5-I: Comparación de Controladores Respecto al Error RMS

Salida	MPC	PID
Error (Sin Perturbación)	0.50	0.56
Error (Con Perturbación)	0.48	0.63

Tanto en los gráficos como en la comparación numérica se observa un mejor desempeño del controlador MPC.

6. CONCLUSIONES.

Según se describió en los capítulos anteriores, los objetivos de la investigación fueron alcanzados, por cuanto:

- El simulador desarrollado para el proceso de aglomeración se mostró apto para analizar el comportamiento dinámico del proceso, así como para la simulación y el diseño de estrategias de control.
- La validación realizada variando las entradas del proceso entregan resultados que indican un comportamiento de acuerdo a lo que se podría esperar en una planta real, tanto frente a variaciones en el flujo másico total de entrada, como en el flujo másico de líquido y el flujo másico de mineral.
- Asimismo, la comparación del desempeño entre un controlador PID y un controlador MPC mostró un mejor comportamiento del controlador basado en modelo.

BIBLIOGRAFIA

Adetayo, A.A., Litster, J.D., Pratsinis, S.E., Ennis, B.J., (1995). *Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution*. Powder Technology 82, 37–49.

Ashok Gupta, Denis Yan. (2006). *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science, 1st. Edition. 718 p.

Bordons, C.; Camacho, E. (2004). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag GmbH, 2nd. Edition, 405 p.

Cisternas, L., Luza, N., Galvez, E. (2010). *Hydrosim, una librería para simulación, modelación y optimización en hidrometalurgia* Universidad de Antofagasta. Informe Inédito, 44 p.

Collao, R. (2006). *Estudio y modelamiento matemático del proceso de aglomeración de minerales de cobre en tambor rotatorio*. Tesis de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Química, Universidad de Chile. 258 p.

Collao, R. (2004). *Modelamiento matemático en el proceso de aglomeración de minerales de cobre en tambor continuo*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico en la Universidad de Chile. 107 p.

Glaser, T., Wang, F., Cameron, I., Litster, J. (2009). *Model predictive control of continuous drum granulation*. Journal of Process Control, 19, 615-622.

Herrera, Miguel. (2007). *Drum Agglomeration Process of a Copper Oxide Mineral. Part 1. The Effect of the Process Parameters on Agglomeration*, KIGAM. Mining and Metallurgical Chilean Research Institute, CIMM. Informe Inédito, 16 p.

Hogg, R. (1992). *Agglomeration models for process design and control*. Powder Technology, Mineral Processing Section. p. 69-76.

Hounslow, M.; Ryall, R., Marshall, V. (1988). *A discretized population balance for nucleation, growth and aggregation*. AIChE Journal, 34 (11), 1821-1832.

Ivenson, S., Wauters, P., Forrest, S. Litster, J., Meesters, G. Scarlet, B. (2001) *Growth regime map for liquid-bound granules: further development and experimental validation*. Powder Technology, 117, 83-97.

K. J. Aström and T. Hägglund. (1995). *Control PID Avanzado*. Pearson-Prentice Hall, 1ra. Edición, 488 p.

- Komulainen, T. (2007). *Novel modeling and control approach for performance improvement of an industrial copper solvent extraction process*. Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology. Informe Inédito. 188 p.
- Lister, J.; Smit, D.; Hounslow, M. (1995). *Adjustable discretized population balance for growth and aggregation*. AIChEJournal, 41, 3, p. 591.
- Liuping Wang. (2009). *Modelo Predictive Control System Design and Implementation Using Matlab*. Springer, 1st. Edition. 406 p.
- Marin, L. (2007). *Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales*. Metsolver. Informe Inédito. 30 p.
- Moreno, L.; Garrido, S.; Balaguer, C. (2003). *Ingenieria de Control: Modelado y Control de Sistemas Dinamicos*. Ariel Ciencia, 1ra. Edición. 488 p.
- Seborg, E and Mellicamp. (2004). *Process Dynamic and Control*. Wiley, 3rd. Edition. 514 p.
- Wang, F.Y., Cameron, I.T., (2002). *Review and future directions in the modelling and control of continuous drum granulation*. Powder Technology 124, 238–253.
- Wang, F.Y.; Ge, X.Y.; Balliu, N.; Cameron, I.T. (2006). *Optimal control and operation of drum granulation processes*. Chemical Engineering Science, 61, 257-267.
- Wang, F.Y., Cameron, I.T. (2007). *A multi-form modeling approach to the dynamics and control of drum granulation processes*. Powder Technology, 179, 2-11.
- Wu, M., Nakano, M., She, J. (1998). *A distributed expert control system for an hydrometallurgical zinc process*. Control Engineering Practice, 1435-1446.