

**SIMULADOR ESTÁTICO GENERALIZADO DE PLANTAS DE
PROCESAMIENTO DE MINERALES**

Julio C. Miranda P.
Candidato a M.Sc. Programa de Graduados
Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad
de Concepción Casilla 4031, Concepción-3, Chile.

Fernando J. Concha A.
Profesor Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
Universidad de Concepción Casilla 53-C, Correo 3
Concepción, Chile.

RESUMEN

En este trabajo se presenta las características generales de la estructura de un simulador estático generalizado (SIMGE) diseñado para plantas de procesamiento de minerales en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción. Se da especial énfasis a la especificación de los circuitos, la metodología de solución, la presentación de la interfaz usuario y la simulación de los módulos incorporados.

Por su característica, el simulador es un programa de fácil manejo que permite ser utilizado por usuarios sin mayores esfuerzos. Además, por tener una estructura modular con documentación completa de cada módulo, puede ser modificado para ampliar su potencialidad. El lenguaje de programación utilizado es FORTRAN.

ABSTRACT

In this work we present the structure of a general purpose static simulator (SIMGE) for Mineral Processing Plants developed by the author at the University of Concepción. Special emphasis is given to the specification of circuits, to the method of solution, to the users interface and to the simulation of specific modules.

The simulator written in FORTRAN language, is easy to use and, due to its modular structure and complete documentation, may be easily modified if necessary.

INTRODUCCION :

La simulación mediante computadores digitales ha adquirido una importancia creciente en los últimos tiempos, debido a sus grandes potencialidades como herramienta de apoyo a la toma de decisiones de la más diversa naturaleza.

Los modelos que se usan hoy para la simulación de procesos de reducción y separación de tamaños fueron propuestos hace muchos años. Estos se interrelacionan para formar un algoritmo que resuelve un determinado circuito. Es así como, la mayoría de los simuladores que han sido propuestos utilizando estos modelos tienen una estructura fija que, de acuerdo al valor de cierto parámetro, pueden ser utilizados para simular una serie de circuitos predeterminados.

Existen varios estudios que proveen una revisión comprensiva de la simulación de procesos, los que son un medio conveniente para presentar el estado de avance de este campo. La revisión más reciente (Biegler and Carnegie - Mellon, 1989) pone en evidencia que el concepto de simulación tipo modular secuencial, que forma la estructura de muchos simuladores de procesos, es utilizada desde fines de la década del 60 y comienzos del 70. El ejemplo más importante lo constituye el paquete ASPEN, el que reúne programas de computación con aplicaciones de simulación de ingeniería química, tanto en estado estático como en régimen dinámico. La construcción de un simulador modular secuencial es relativamente fácil de implementar, y la característica de modular ofrece gran ventaja para la expansión de las capacidades del simulador. Esta es la arquitectura que más se encuentra en los simuladores comerciales, en el área de Ingeniería Química.

El diseño de la estructura base de cualquier programa computacional, tal como un simulador de procesos, tiene un rol importante en el desarrollo del mismo, como en su posterior divulgación. Desafortunadamente, con la excepción de un paquete simulador grande tal como ASPEN, muy poco tiempo ha sido dedicado a este aspecto en los muchos simuladores de procesos existentes. Sin embargo, se sostiene que cualquiera de los simuladores existentes son modulares y fácil de modificar. Esto no es generalmente cierto cuando uno realmente quiere hacer la modificación.

En este trabajo, se ha dedicado un importante esfuerzo al diseño de la estructura de un simulador para satisfacer los requerimientos del área de procesamiento de minerales, resultando un simulador de proceso mucho más flexible, modificable, y usable que cualquiera de los existentes.

Ante la necesidad de disponer de una estructura ejecutiva generalizada para simular cualquier configuración de circuito, como también cualquier tipo de circuito, sea de molienda flotación u otros, que además permita aumentar su potencialidad con la incorporación de nuevos modelos, se desarrolló un paquete simulador, incorporándose por el momento los modelos de molienda y clasificación.

La metodología para la simulación del circuito de molienda clasificación, como se ha implementado en el paquete SIMGE, involucra una etapa previa relacionada con la estimación de parámetros para los modelos utilizados. Considerando la naturaleza empírica de los modelos involucrados, esta etapa es

indispensable.

El ajuste grueso de datos experimentales, denominado ajuste de balance debe ser realizado como una etapa previa, para poder estimar los parámetros.

CARACTERISTICAS DE DISEÑO

El principal objetivo de un simulador de circuito de molienda es permitir el estudio las respuestas y el rendimiento de una operación unitaria individual o de un circuito, como función de varias estructuras de diseño y variables de operación. Logrando este objetivo, un simulador generalizado de plantas de procesamiento puede encontrar uso en muchas áreas a distintos niveles.

- I - Educación y entrenamiento,
- II - Diseño de plantas,
- III - Investigación.

En el primer nivel, el usuario debe ser capaz de operar el simulador con una mínima cantidad de información y esfuerzo. El simulador es simplemente una herramienta de instrucción, que el usuario utiliza para ejecutar una simulación de operación unitaria o planta, de modo que pueda comprobar los efectos que sobre ellas tienen los parámetros de operación.

En el segundo nivel, el usuario aún desconoce los detalles de la operación del simulador, pero ahora, más bien que ejecutar un módulos de simulación como un ejercicio de entrenamiento, desea crear sus propios módulos mezclando y apareando debidamente varias operaciones unitarias para crear un circuito.

Finalmente en el tercer nivel, el investigador se interesa en tomar el simulador separadamente, insertando sus propios modelos y usando la misma estructura ejecutiva básica, pero ahora con los nuevos modelos o capacidades adicionales.

Parte de esta filosofía de diseño en sus tres niveles ha sido incorporada dentro del paquete. El nivel de simulación I provee una lista de operaciones unitarias y circuitos preconstruídos, tal que el usuario puede hacer una selección en forma interactiva. El nivel II, permite al usuario seleccionar desde una lista de módulos de operación unitarias e interactivamente construir un circuito para simular. Finalmente, el nivel III, es un procedimiento estándar que está disponible al usuario para ajustar su módulo de simulación dentro de la estructura ejecutiva del paquete.

En una revisión crítica de los simuladores existentes (Miranda 1990), se identificaron los requerimientos de diseño de flexibilidad, modificabilidad, y usabilidad como las capacidades deseables de un simulador de procesamiento de minerales. Una gran parte de la filosofía de diseño para este simulador fue identificar técnicas para satisfacer estos requerimientos.

La filosofía de diseño usada en el desarrollo de SIMGE puede ser resumida de la siguiente manera:

- (a) Operación en niveles múltiples,
- (b) Diseño modular,
- (c) Metodología de especificación de circuitos simple,
- (d) Estructura de módulos unitarios estándar y procedimiento de modificación,
- (e) Comunicación interactiva manejo de menú,
- (f) Selección y adaptación de modelos para análisis de procesos,
- (g) Economía de cálculos.

ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

Como se mencionó previamente, SIMGE ha sido diseñado como un simulador de propósitos generales, totalmente independiente del módulo usado para la simulación de una operación unitaria. Además, se utilizó una técnica de construcción del simulador una estructuración en el que fue incorporada el desarrollo desde arriba - abajo.

En la parte superior, el simulador consiste de un programa de enlace. Por debajo de éste se encuentra el ejecutivo principal y una serie de subrutinas que constituyen la interfase usuario y la base de modelos tanto de estimación de parámetros como de simulación de las operaciones unitarias involucradas en un circuito de molienda clasificación.

El programa enlace se diseñó para proveer un control total del programa. Este trabaja en los niveles de prioridad más altos e interactúa con el trabajo exterior solamente vía la interfase usuario. Sin embargo, cuando se realiza la simulación, el control pasa al ejecutivo quien resuelve el circuito y utilizando la interfase usuario despliega mensajes e interactúa con el usuario. Por esto el ejecutivo, sirve como director de la simulación proveyendo una estructura general sobre la cual instalar las subrutinas.

Especificación de circuitos y metodología de solución

Como el objetivo global de este trabajo ha sido simular tanto operaciones unitarias en forma aisladas como circuitos completos, se ha implementado una metodología general que es adecuada para trabajar tanto con las unidades como con circuitos. Adaptando esta metodología es posible trabajar con los flujos de cada módulos en forma independiente de si se trata de una simulación de una operación unitaria o de un circuito. Esta sección discute la técnica de especificación de circuito, convención para el manejo de datos de las corrientes, y metodología de solución de circuitos.

Explicaremos la especificación de un circuito a través de un ejemplo de aplicación. Se toma un circuito típico de

Se introducen pseudomezcladores en aquellos casos donde hay más de dos corrientes de entradas, ellos no representan operaciones físicas.

Se puede observar que la enumeración de bloques y flujos es arbitraria, pero se recomienda enumerar los flujos o bloques en forma consecutiva comenzando con los que encuentran al comienzo del circuito. Como cada modelo fue diseñado como un módulo independiente, la numeración no puede aparecer más de una vez, a no ser que la salida de un módulo corresponda a la alimentación del otro. La numeración de los módulos y flujos aparece mostrada en la Figura 2.

Si el flujograma es complejo se puede considerar una subdivisión en bloques, bloques con reciclo y bloques seriales, esto es útil para la confección de la información del tipo de circuito accesado al archivo de datos de configuración.

Método de solución secuencial:

El método de solución secuencial es una forma estructurada de del procedimiento como los ingenieros han realizado los balances por décadas. Este se basa en dos conceptos claves:

1. Cada operación en un circuito es considerada como un modelo compuesto de las ecuaciones necesarias para transformar los flujos de entrada en flujos de salida.
2. Todos los circuitos pueden ser divididos en grupos, es decir, en un conjuntos de modelos que se puedan resolver en forma serial o en aquellos en que existe un reciclo en la estructura. Estos grupos son calculados independientemente en el orden que ellos aparecen en el circuito.

Conjuntos serial:

Conjunto serial es el grupo más grande de módulos que se pueden calcular en secuencia, trabajando desde el inicio al final del circuito. Cada entrada a los módulos es conocida antes que se calcule las salidas para ese módulo. Un conjunto serial se calcula en una etapa simple, sin iteraciones. El grupo serial más pequeño puede ser un módulo simple. Si nos referimos a la Figura 2, vemos que los módulos del molino de barras y partidor forman un grupo serial en ese circuito. Evidentemente que si un grupo serial es precedido por un conjunto con reciclo, el conjunto con reciclo se debe resolver primero. Muchos circuitos de trituración son grupos seriales.

Conjunto con reciclo

Conjunto con reciclo son los grupos más pequeños de módulos que no se los puede calcular en la forma convencional de un conjunto serial, desde el inicio al final. En un conjunto con reciclo no existe módulo en el cual todas las entradas son conocidas, esto

es, que no hay un punto de comienzo aparente para un cálculo ordenado. El conjunto con reciclo más pequeño son dos módulos. La presencia de estos conjuntos con reciclos hacen necesario un cálculo iterativo.

Sustitución Sucesiva

Observando la Figura 2, vemos que el conjunto tolva de alimentación, trituradora y harnero, se satisface la definición de conjunto con reciclo, es decir, no hay un módulo para el que todos las entradas sean conocidas. Un camino de cálculo lógico no es evidente en este circuito. Para resolver éste se introduce el término de tanteo. Primero tomamos en forma arbitraria una corriente interna, que posteriormente se puede suponer con dos enumeraciones, la numero 2 y 18 como se muestra en la Figura 3.

Si suponemos que la corriente 18 es conocida, tendríamos un camino de cálculo serial a través del conjunto. Usando el valor supuesto (de tanteo) del flujo 18 se puede calcular el modelo de trituradora para dar un valor del flujo 3.

Así, el módulo del harnero recibe una corriente de entrada conocida y se puede calcular las corrientes de salida 4 y 5. Como la corriente 1 es conocida y tenemos un valor de la corriente 4, se puede calcular la alimentación al ciclo que es el valor de la corriente 2. En este punto, sin embargo, a no ser que el valor supuesto para la corriente 18 sea muy cercano del valor verdadero, la corriente 2 será equivalente a la corriente 18. Como estas corrientes son equivalentes, deben iguales o sus valor estar cerca, dando un error que este dentro de cierta tolerancia.

Este criterio se aplica a cada componente de la corriente, sólidos secos, agua total, y todas las fracciones de tamaños.

Varios criterios pueden ser usados para evaluar el error. Se utiliza un error definido como:

$$\text{Criterio de convergencia} = \frac{\text{valor asumido} - \text{valor calculado}}{(\text{valor calculador})^{**2}}$$

Para la aparición de reciclo dentro de un circuito, la convención ha sido adoptar que el flujo de reciclo dentro de un lazo está dada por el número más alto. Esto no es obligatorio, pero hace que el sistema de numeración sea más consistente. Para una unidad con una corriente de alimentación y dos corrientes de productos, tal como un hidrociclón, la corriente que recircula siempre tendrá el número más alto.

El archivo de datos para la especificación del circuito de la Figura 2 se muestra en la Figura 4.

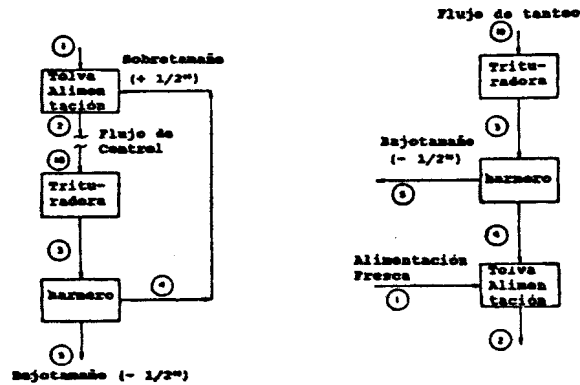


Figura 3: Esquema de selección de circuitos con reciclo.

ARCHIVO : configuracion figura M 2 circuito molienda
PARAMETROS :

- i : identificación del elemento
 - B : Molino de bolas
 - Mod : 1 Modelo simplificado
 - 2 Modelo de Austin
 - R : Molino de barra
 - Mod : 1 Modelo simplificado
 - 2 Modelo de Austin
 - C : Hidrociclón
 - Mod : 1 Modelo simplificado
 - 2 Modelo de Lynch y Rao
 - 3 Modelo de Plitt
 - P : Pozo
 - D : Divisor carga
 - M : Mezclador
 - H : Circuito hidráulico

e1,e2: entradas al modulo
s1,s2: salidas del modulo
NP : número de parametros
Nr : índice recirculación
NVT : número de variables totales por flujo
Mod : tipo de modelo

```
NVT
III
15
# i e1 e2 s1 s2 NP Nr Nombre
III A III III III III III III
1 M 5 -6 7 0 0 0 0 Mezclador
2 R 7 0 8 0 11 0 0 MolinoBa-1
3 P 8 0 10 9 1 0 0 Partidor
4 M 10 -11 12 0 0 0 0 Mezclador
5 H 12 13 13 0 0 1 0 Mezclador
6 B 13 0 14 0 11 1 0 MolinoBa-1
7 P 14 -15 16 0 2 1 0 Pozo
8 C 16 0 17 18 15 1 1 Hidroc.
Fin de especificación del Circuito
```

Figura 4 : Archivo de configuración

COMPONENTES DEL SIMULADOR

Como se discutió en las secciones anteriores el simulador de procesamiento de minerales SIMGE consiste de cuatro elementos básicos: Un programa de enlace, el ejecutivo, la base de modelos e interfaz usuario.

Módulos Ejecutivos

La estructura ejecutiva de SIMGE ha sido desarrollada con tres niveles de jerarquías. En el nivel superior, el ejecutivo principal, representado por el programa enlace, controla toda la estructura del programa por llamado de todos los módulos de tareas principales requeridas por el paquete. La ejecución de una simulación comienza y termina en este nivel.

Cuando se toma un nivel de operación, el control se pasa a un nivel subejecutivo. La función principal de un nivel subejecutivo es hacer las preparaciones necesarias para ejecutar una simulación. Esto involucra la selección del circuito (nivel I) o especificación del circuito (nivel II), la entrada de datos, la selección de los modelos disponibles y la simulación.

El nivel más bajo de la jerarquía ejecutiva, dentro del módulo de simulación, es el módulo subejecutivo de simulación. Este es el que hace el trabajo principal en el paquete. Su función es tomar la información de especificación obtenida por el nivel ejecutivo y llamar las subrutinas necesarias para simular el circuito u operación unitaria. Además, el módulo subejecutivo actúa como una interfaz para la incorporación de nuevos módulos de simulación al paquete. Por lo tanto, ésta no es una estructura totalmente fija para este módulo. Detalles de éste módulo se darán más adelante.

Para el módulo de simulación de un circuito la estructura ejecutiva está bien definida e incluye una secuencia de trabajo dependiendo de si se trata de un grupo con reciclo o de un grupo serial.

La jerarquización del ejecutivo tiene la ventaja de hacer fácil cualquier modificación del paquete como también de distribuir la carga de trabajo de una manera lógica.

Base de modelos

La base de modelos está constituida por aquellos modelos que representan las operaciones unitarias que forman un circuito convencional de molienda. Estos modelos están codificados en lenguaje Fortran, con la estructura de subrutinas, y son utilizados de acuerdo a las especificaciones que se dan en el archivo de configuración. Para la selección de los modelos se despliega un menú, con los modelos disponibles para cada unidad. Cuando se realiza la simulación de un circuito se presenta este menú para cada operación involucrada, de acuerdo al orden que aparece en el circuito.

Entrada y salida de información

Como previamente se mencionó, SIMGE, contiene todas las rutinas asociadas con la entrada y salida hacia y desde el paquete simulador, como también rutinas para el uso interactivo. Estas rutinas se construyeron con el propósito de realizar un ágil manejo de datos y darle al paquete las características de interactivo.

La interfaz usuario es el medio por el cual, toda información desde el medio exterior es incorporada dentro del paquete simulador y como éste presenta sus resultados.

Los elementos principales de la interfaz usuario: La subrutina de manejo de menú, la subrutina de entrada de datos y la subrutina de salida de datos por pantalla o archivo, son el eje del diseño orientado al usuario, que proporcionan las necesidades de servicios básicos para la utilización del simulador en procesos metalúrgicos.

APLICACION

Para mostrar algunas de las capacidades del simulador, se realiza el ejercicio de simular el aumento de capacidad de un circuito de molienda convencional, cuando se disminuye el cortocircuito de la batería de hidrociclones. Como primer paso, se debe disponer de una grupo de datos experimentales para determinar: Distribución de Tiempos de Residencia del molino, Parámetros del modelo de hidrociclón, y datos de molienda batch para el mineral tratado. En el simulador se toma la opción de determinación de parámetros y se elige la opción de Hidrociclón, DTR y retrocálculo de parámetros del modelo cinético de molienda.

Posteriormente, con los parámetros determinados, se realiza la simulación para el circuito estudiado, en este caso un circuito directo. Cuando se logra el estado estacionario, verificamos cual es el porcentaje retenido en la malla de control del rebalse de hidrociclones. Posteriormente simulamos el cortocircuito del hidrociclón y el flujo de alimentación, hasta llegar a un valor cercano al de la malla de control del rebalse del hidrociclón en las condiciones reales de la planta.

Algunos de los pasos señalados anteriormente se muestran en las Figuras 5, 6, 7, 8.

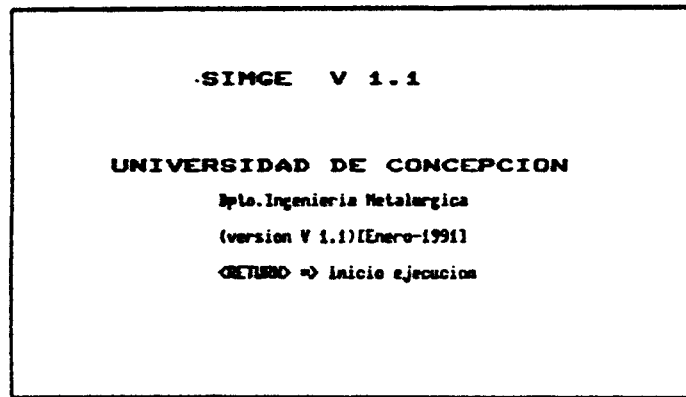


Figura 5 : Presentación del programa simulador generalizado.

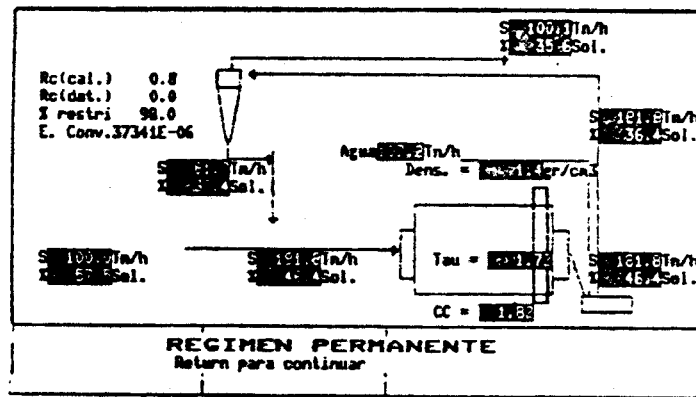


Figura 6 : Simulación de un circuito directo típico de molienda-clasificación.

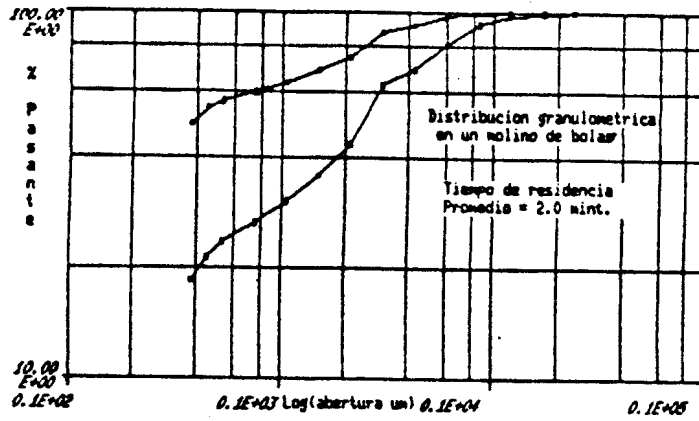


Figura 7: Presentación en forma gráfica de datos de simulación de un molino de bolas.

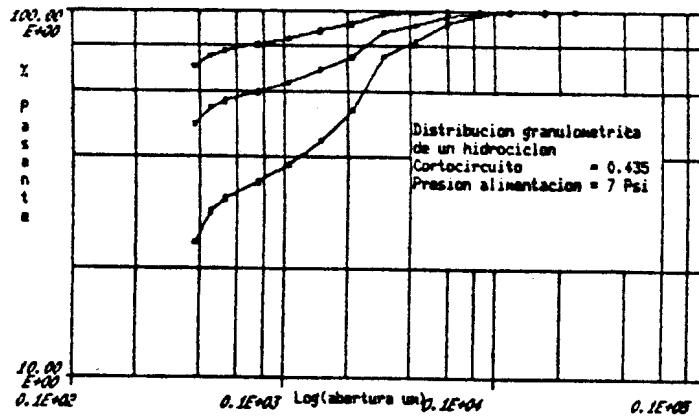


Figura 8: Presentación en forma gráfica de datos de simulación de un hidrociclón.

CONCLUSIONES:

Este trabajo presenta un paquete computacional que esperamos sea de interés para la comunidad nacional de procesamiento de minerales. Las pruebas realizadas hasta el momento, indican que se satisfacen plenamente los objetivos planteados. En la actualidad se trabaja en la generación de módulos que aumenten su potencial uso. Para contribuir a su difusión se trabaja en su adecuación a computadores personales, y para ello se utilizará el lenguaje C++ para aprovechar toda la capacidad de estos equipos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado dentro del proyecto PNUE/CHI/88/011. Se desea agradecer a las siguientes instituciones: Programa para el Desarrollo de Naciones Unidas, Codelco-Chile, Cia. Minera Disputada de las Condes, Universidad de Concepción y Organización de Estados Americanos, a través de su Curso Panamericano de Metalurgia Extractiva.

REFERENCIA:

1. Adel, G. "An Interactive Simulation Package for Mineral Processing Systems" Tesis Phd. University of California, Berkeley, (1982).
2. Austin, L. Klimpel, K. and Luckie, P. "Process Engineering of Size Reduction", SME, New York, 1984
3. CANMET "The SPOC Manual", Canada Centre for Mineral and Energy Technology", SP85-1/3, Ottawa, Ontario, 1985.
4. Ford, M. and King, R. "The Simulation of ore-dressing Plants", Int. J. Miner. Process, 12, pp 285-304, 1984.
5. Lorenz T. Biegler, Carnegie-Mellon, " Chemical Process Simulation", Chem. Engineering Progress, pp 50-66, October, 1989.
6. Lynch, A.J., "Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation, Design and Control". Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
7. Miranda, J.C. " Simulador Estático Generalizado para plantas de molienda-clasificación", Tesis Msc. Universidad de Concepción, Chile, 1991. No publicada.
8. Richardson, J.M. and White, J. W. 1982, "Mass Balance Calculations for Comminution Circuits" Design and Installation of Comminution Circuits, Editors Andrew Mular, Gerald Jerrgensen AIME 1982 Chapter 11 pp. 150-175.

