

# APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS MINERAIS NA ENGENHARIA DE PROJETOS

Afrânio Franco Machado  
PAULO ABIB ENGENHARIA S.A.

## Abstract

This paper presents a review of the main models adopted for the simulation by computer of the most important operations in the mineral industry. Use of modern computers are highlighted as tools for fast and accurate calculations, producing an excellent work with the highest quality, which was not possible in the past. Comments are briefly made on practical cases concerning the application of these techniques in Project Engineering.

**Keywords:** Simulation, modelling, Mineral Technology, Project Engineering, Computers.

## Resumo

O trabalho faz a revisão dos principais modelos adotados na simulação por computador das mais importantes operações da indústria mineral. Ressalta-se a utilização dos modernos computadores como ferramentas para obtenção de rapidez e precisão nos cálculos, permitindo-se a geração de trabalhos de mais alta qualidade, o que não era possível no passado. Comenta-se sumariamente sobre casos práticos de aplicação dessas técnicas na Engenharia de Projetos.

**Palavras-chaves:** Simulação, modelamento, Tecnologia Mineral, Engenharia de Projeto, computadores.

## **1 - INTRODUÇÃO**

A utilização da simulação de processos minerais na Engenharia de Projetos é um assunto de grande relevância, devido sobretudo às implicações sobre a qualidade e rapidez dos resultados obtidos, entre outras.

Este trabalho relata inicialmente o conhecimento atual sobre o assunto, descrevendo-se as capacitações e limitações dos modelos existentes de diversas operações unitárias. O enfoque será voltado aos pacotes de software mais conhecidos comercializados no mercado e outros de utilização reservada.

Finalmente são apresentados casos práticos de aplicação da tecnologia de simulação com sucesso. Dentro das limitações de espaço disponível para este trabalho são fornecidos detalhes das informações obtidas e são tecidas considerações sobre as dificuldades e vantagens encontradas.

## **2 - CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS**

O emprego da simulação de processos minerais utilizando-se modelos matemáticos iniciou-se relativamente há pouco tempo, na década de 60. O começo tardio de utilização dessa ferramenta tão importante foi ocasionada pela complexidade dos processos minerais com a consequente dificuldade de modelagem, aliada à falta de disponibilidade ampla de computadores com elevada memória e rapidez de processamento. O advento dos microcomputadores PC provocou uma revolução nos hábitos dos engenheiros de processamento mineral, gerando-se a partir de então o desenvolvimento acelerado dos modelos e dos simuladores e um incentivo poderoso na sua aplicação para a solução dos problemas profissionais do dia-a-dia.

A simulação de processos que, até aquela data, somente podia ser feita através de reprodução das condições de processo em laboratório e planta-piloto, passou então a ser conduzida também nos escritórios com o uso intensivo do computador. É evidente que a aplicação dos simuladores necessita da execução de ensaios experimentais e/ou de coleta de dados industriais com o objetivo de determinar os parâmetros dos modelos matemáticos e assim permitir uma utilização adequada. Sem os parâmetros específicos para a situação em tela, o simulador somente produzirá resultados enganosos e não representará, por conseguinte, a operação do processo a que se refere.

Vários são os pacotes de software de simulação comercializados junto à comunidade de especialistas em Tecnologia Mineral. Dentre eles se sobressaem o **CAMP** - Computer Aided Mineral Processing - (ex - **SPOC** - Simulated Processing of Ore and Coal), desenvolvido pelo **CANMET** do Canadá; o **USIMPAC**, desenvolvido pelo **BRGM** da França; e o **JKSimMet** do **Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre da Austrália**. Além desses, o pacote **MINDRES** do **CSIRO Division of Mineral and Process Engineering da Austrália** é oferecido no mercado e tem capacitação de descrever correntes de fluxo de processo de polpa de multi-componentes. Cada um dos pacotes acima tem as suas peculiaridades, fortalezas e limitações que devem ser consideradas durante a etapa de seleção para aplicação a uma determinada situação que se deseja abordar. É muito importante levar em conta a facilidade de interação do usuário com as rotinas operacionais do software, o que torna mais conveniente e portanto mais recomendável o manuseio de um determinado pacote.

A idéia de montar pacotes de software de simulação é muito conveniente, uma vez que ali se encontram vários simuladores para diversas operações da indústria mineral, a saber: britagem, peneiramento, classificação, hidrociclones, espessamento, filtração, concentração de espécies minerais, etc. Como uma planta industrial é normalmente composta de várias operações unitárias, muitas vezes é interessante e por vezes necessário simular conjuntos de operações ou mesmo a planta total. A possibilidade dessa categoria de simulação deve ser contemplada no pacote. Uma característica desejável do pacote em geral ou dos simuladores em particular reside na sua flexibilidade de se acomodar a situações específicas, o que pode ser conseguido através da calibração do modelo quando se dispõem de dados experimentais.

Um simulador alternativo para operações individuais ou para a planta total com todos os seus circuitos pode ser encontrado como um pacote de utilização reservada. Ele é capaz de simular o balanço de massas, previamente determinado através de simulação experimental ou por modelos, quando se estabelecem certas mudanças de variáveis na planta, tais como: taxas de alimentação, teores, concentrações de sólidos, etc. Tais simuladores que não utilizam modelos matemáticos, porém valores de partições de massas de sólidos, de água e de metais, podem ser de grande valia na atualização de balanços ou na avaliação do impacto de flutuações de variáveis de processo sobre os resultados do balanço. Uma das aplicações importantes desses simuladores seria no controle de processo utilizando-se Sistemas Especialistas, pois eles permitem prever com rapidez e alta precisão as alterações no processo e dessa maneira orientar mudanças através de regras pré-estabelecidas dentro do Sistema Especialista de Controle. É válido lembrar as vantagens de se utilizar este software para as revisões que são feitas no balanço de massas durante a elaboração do Projeto de Engenharia, em contraste com a demorada e tediosa execução de revisões manuais, sempre acompanhadas da probabilidade elevada de erros humanos.

## **2.1 - Modelos**

Serão feitos a seguir comentários sobre alguns dos modelos que se aplicam com maior frequência à simulação de processos minerais.

### **2.1.1 - Britagem**

Os modelos empregados na simulação de britadores se baseiam, de maneira geral, nas seguintes funções básicas:

- a probabilidade de quebra de partículas de tamanho  $x$  pela máquina;
- a distribuição de tamanhos dos fragmentos finos produzidos pela quebra das partículas.

Introduziu-se uma abordagem através de cálculo matricial para descrever a redução do tamanho de partículas dentro dos britadores. A idéia é basicamente a seguinte: há uma seleção de partículas baseada em tamanhos seguida do fenômeno de quebra, com o que se imagina

reproduzir o que ocorre dentro dos britadores. As partículas selecionadas são então fragmentadas de acordo com uma função de quebra, enquanto as remanescentes permanecem intactas.

Para o britador primário giratório, a distribuição granulométrica da descarga apresenta um tamanho  $P$  onde 80% em massa das partículas é passante, dado pela seguinte expressão:

$$P = 25.400 S_0 (0,04 \times W_i + 0,40),$$

onde:  $S_0$  é a abertura de saída da posição aberta (OSS) em polegadas e  $W_i$ , em kwh/st, é o índice de trabalho de Bond ("Work index") como determinado no ensaio de britabilidade.

A capacidade do britador primário giratório é proporcional à área de descarga, dada por:

$$T = kS_0 (L - 3,1416 G),$$

onde:  $T$  é a taxa de alimentação média (tonelada curta por hora),  $k$  é uma constante de valor aproximadamente igual a 0,75,  $S_0$  é a abertura de saída na posição aberta (OSS) em polegadas,  $L$  é o perímetro externo da abertura de entrada em polegadas e  $G$  é abertura da alimentação em polegadas.

A potência do britador primário giratório pode ser estimada através da equação:

$$H = \frac{0,0841 W_i ((R - 1) / R) T}{S_0 \times (0,04 W_i - 0,4)}$$

onde:  $H$  é o consumo de potência em HP,  $T$  é a taxa de alimentação horária (tonelada curta por hora),  $W_i$  é o índice de trabalho de Bond ("Work-index) em Kwh/tonelada curta,  $S_0$  é a abertura de saída na posição aberta,  $R$  é a relação de redução ( $F/P$ ) e  $F$  é o tamanho em microns onde 80% em massa é passante.

A distribuição granulométrica do produto é obtida através de cálculo de matrizes.

Para os britadores de mandíbulas, de cone secundário e terciário e de rolos, os modelos são específicos, apresentando semelhanças com o que foi descrito para o britador giratório primário.

### 2.1.2 - Moinho de bolas

Os modelos de simulação de moinhos de bolas utilizam os seguintes parâmetros:

- distribuição de tamanhos produzida pela quebra de um tamanho específico  $i$ ;
- taxa de quebra de partículas de tamanho determinado  $i$ ;
- distribuição do tempo que as partículas são submetidas ao processo de quebra.

O chamado modelo cinético de moinhos de bolas consegue determinar as quantidades acima, baseando-se em algumas premissas básicas, a saber:

- dentro do moinho, a distribuição de tamanhos gerados a partir de um tamanho determinado  $i$  permanece constante, desde que as condições operacionais estejam constantes;
- igualmente a taxa de quebra de um tamanho determinado permanece constante, se as condições operacionais não se alterarem;
- a distribuição de tempos de residência permanece constante para todos os intervalos granulométricos. Este conceito pode ser normalmente para a fase fluida.

O método de solução do modelo cinético envolve o cálculo do produto matricial de um vetor formado pela distribuição granulométrica da alimentação do moinho pelo vetor **operador de moagem**. O cálculo do vetor **operador de moagem** envolve três funções:

- distribuição do tempo de residência;
- distribuição ou quebra  $B$ ;
- função de seleção  $S$ .

A distribuição do tempo de residência  $h(t)$  pode ser descrita por um modelo de misturadores em série, o qual é definido por três parâmetros, a saber:

- $t_p$ , tempo de atraso referente ao fluxo pistão;
- $m$ , número de misturadores;
- $t_m$ , tempo médio de residência do  $m$ -ésimo misturador.

A função ou distribuição de quebra  $B$  representa a distribuição de tamanhos de fragmentos gerados a partir dos intervalos granulométricos superiores. Forma-se uma matriz triangular inferior  $B$  com zeros na diagonal.

A função de seleção  $S$  é determinada por um vetor com dimensão de inverso do tempo ( $t^{-1}$ ). Representa a taxa de quebra de tamanhos granulométricos envolvidos. Pode-se mostrar que a função  $S$  depende maiormente das condições operacionais e do ambiente do moinho (geometria, concentrações de sólidos, tamanhos de bolas etc), enquanto a função  $B$  é relacionada sobretudo às características intrínsecas do minério, podendo ser estimada a partir de experimentos de laboratório.

Tanto a função  $B$  com  $S$  podem ser representadas analiticamente por meio de parâmetros determinados através de otimização de funções. As expressões analíticas podem ser bastante complexas, envolvendo então uma maior aproximação do modelo.

### 2.1.3 - Peneiramento

Há três modelos para simulação da operação de peneiramento: **Karra**, **Whiten** e **Valliant**. Tratar-se-á a seguir resumidamente do mais importante deles, o método de Karra.

O modelo de Karra foi desenvolvido a partir de uma grande quantidade de ensaios conduzidos experimentalmente, obtendo-se uma excelente reprodutibilidade na simulação dos valores medidos.

Aplica-se tanto a operações a úmido como a seco.

Resumidamente pode-se dizer que o modelo relaciona o  $d_{50c}$  aos parâmetros característicos dos equipamentos e das respectivas correntes de alimentações.

A expressão matemática de  $d_{50c}$  é:

$$d_{50c} = h_T \cdot \left( \frac{T_u / S}{K.A.B.C.D.E.F.G.} \right)^{-0,148}$$

onde:

$d_{50c}$  - tamanho de partículas com igual probabilidade de se encaminhar tanto para a corrente do **oversize** quanto para a do **undersize**;

$h_T$  - abertura da malha;

$T_u$  - taxa teórica de massa no undersize;

S - área da superfície de peneiramento;

A, K, B, C, D, E, F, G - fatores convencionais de peneiramento.

A função de partição é dada pela expressão:

$$Y_i = (1 - \exp(-0,6931 (d_i / d_{50c})^m)) (1 - R_f) + R_f$$

onde:

$d_i$  - média aritmética do diâmetro de partícula no intervalo granulométrico  $i$ ;

$R_f$  - fator de "by-pass";

$Y_i$  - fração do material do intervalo granulométrico  $i$  da alimentação que se encaminha para o produto grosso;

m - coeficiente de nitidez de separação.



A forma da expressão acima é equivalente, como se observa, à expressão de Rosin-Ramler.

#### 2.1.4 - Hidrociclones

Muito se tem falado sobre os modelos matemáticos empregados em simulação de operações com hidrociclones. É possível com os recursos atualmente existentes simular com grande precisão esta operação. O modelo mais comumente empregado foi desenvolvido por **Linch** (2) e sobre ele disserta-se resumidamente a seguir.

Com o modelo de **Linch** pode-se mesmo simular o hidrociclone com razoável precisão, mesmo na ausência de dados experimentais que poderiam propiciar a determinação dos parâmetros do modelo e sua consequente calibração.

No modelo estão incorporados a geometria do hidrociclone, as características da polpa de alimentação (densidades de sólidos, concentrações, taxas) e a pressão na entrada do hidrociclone.

Calcula-se o valor de  $d_{50c}$  e os valores da função de partição para a corrente de grossos através de expressões analíticas específicas. De posse dessas variáveis, é possível determinar as distribuições granulométricas dos produtos, suas vazões e porcentagens de sólidos.

Há também o simulador desenvolvido por Arteburn (5) que utiliza fatores empíricos para correção do  $d_{50c}$  em função de variações ocorrendo na porcentagem de sólidos em volume, pressão de entrada e densidade real do sólido. O simulador apresenta bons resultados compatíveis com valores experimentais.

### 2.1.5 - Flotação

O modelamento do processo de flotação é muito difícil de ser feito, dada à complexidade dos fenômenos de superfície e à necessidade de avaliar a influência das diversas variáveis envolvidas, as quais nem sempre são possíveis de mensurar.

Na flotação, dois fenômenos ocorrem simultaneamente: a adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas e o arraste de partículas, seja hidrofóbicas, seja hidrofílicas, pela espuma. Verifica-se que as partículas hidrofóbicas flutam a taxas que são proporcionais à sua concentração na polpa, enquanto as partículas arrastadas são transportadas em uma taxa proporcional à taxa de flotação da água. Estas observações são levadas em conta em inúmeros modelos existentes.

No entanto, os parâmetros cinéticos determinados em escala de bancada não se aplicam com precisão aos modelos que procuram traduzir a operação de circuitos contínuos de flotação. Isso foi verificado em anteriores tentativas de simulação de circuitos, devendo-se ao fato de que os parâmetros são específicos das condições que ocorrem em um determinado estágio, variando-se portanto em função da posição no circuito. Por outro lado, é fundamental a influência das cargas circulantes, tornando-se difícil a tarefa de simular com precisão.

Ainda mais, é necessário salientar que, sobretudo nas células mecânicas convencionais, a espuma exerce um papel de extrema importância sobre o teor e a recuperação das espécies valiosas, uma vez que pequenas variações na altura da camada (que é de pequena magnitude nas células mecânicas) vão acarretar alterações significativas no processo. Não estão disponíveis no momento modelos que descrevam com fidelidade o comportamento instável dessa condição de espuma.

Já as colunas de flotação apresentam-se mais favoráveis para o modelamento do que as células mecânicas, em virtude dos seguintes pontos:

- a polpa é modelada com maior facilidade, sobretudo no que concerne à distribuição dos tempos de residência;

- a zona de espuma é profunda e mais estável, apresentando um comportamento metalúrgico mais constante.

Ao par dos problemas inerentes à simulação do circuito de colunas como um todo, é importante realçar a necessidade de precisão no escalonamento das condições obtidas em ensaios piloto, com o objetivo de evitar os insucessos em novos projetos, o que infelizmente ocorreu em uma certa extensão no passado. Assim é que a determinação de diâmetros de coluna para atender aos requerimentos de capacidade torna-se um assunto de extrema importância.

A experiência industrial tem demonstrado que a capacidade de transporte  $C_M$  (em dimensões de  $g/min/cm^2$  ou equivalentes), que representa a taxa máxima de transporte de sólidos nas espumas, pode ser substancialmente menor em colunas de grande diâmetro, quando comparada à taxa máxima observada em colunas piloto, havendo em casos específicos reduções da ordem de 50%.

Sabe-se também que  $C_M$  é dependente do valor praticado de bias na coluna. Bias é definido com a diferença entre a taxa volumétrica de água de lavagem e a taxa de água saindo nas espumas. Quanto maior o bias, tanto menor se torna  $C_M$ . O bias pode ser aumentado, seja aumentando-se a taxa de água de lavagem, seja diminuindo-se a taxa de ar.

É possível demonstrar que, operando-se uma coluna com um bias ligeiramente positivo ou próximo de zero, obtém-se a maximização do teor do concentrado. Aumentando-se ligeiramente o bias acima desse valor, provoca-se um pequeno aumento do teor, ao custo de uma perda considerável em recuperação.

No dimensionamento de colunas industriais a partir de dados obtidos em planta piloto, deve-se levar em consideração que o tempo de residência de projeto deve ser maior pelas seguintes razões:

(a) - curto-circuito - uma vez que a coluna maior tem um padrão de escoamento de fluido que é mais próximo de tanque agitado do que de tanque com fluxo pistão (sendo este o caso da coluna piloto) é necessário um tempo de residência maior para se conseguir uma

mesma recuperação na zona de coleta da coluna industrial, em comparação com a coluna piloto;

(b) - **maior carga circulante interna** - dado que uma coluna industrial tem uma maior carga circulante interna e, conseqüentemente, uma menor recuperação nas espumas RF, é necessário ter uma maior recuperação na zona de coleta do que na coluna piloto, objetivando-se atingir a mesma recuperação global na coluna industrial.

O simulador de colunas deve incorporar as características acima descritas. Com o simulador pode-se demonstrar que, aumentando-se a relação comprimento/diâmetro ou usando-se chicanas axiais adequadas, é possível atingir os mesmos níveis de seletividade obtidos na operação da coluna piloto.

Em uma série de ensaios de simulação executados por **Dobby** (1), demonstrou-se que para obter-se resultados metalúrgicos aos de uma coluna piloto com tempo de residência de 12 minutos, foi necessário utilizar-se uma coluna de 12 metros de altura de zona de coleta (15 metros de altura total), o que resultou em tempo de residência nominal de 31 minutos.

A alta taxa de circulação ocorrendo na planta industrial implica na necessidade de aumentar o nível de adição de ar. O ar adicional é necessário para providenciar uma área superficial adequada, bem como condições convenientes de empuxo na zona de espumas. Como já foi mencionado anteriormente, uma taxa mais elevada de gás ou ar resulta em um bias menor, mantendo-se constantes as demais condições.

### **2.1.6 - Separação gravimétrica**

O advento da flotação como um processo importante de separação de espécies minerais talvez tenha contribuído para um desenvolvimento mais lento da simulação por meio de modelamento matemático dos processos de separação gravimétrica.

Recentemente, no entanto, dada a preocupação com o abaixamento dos custos industriais, as técnicas de separação magnética ganham um ímpeto renovado que tem levado os pesquisadores a se debruçarem mais detidamente sobre os estudos de desenvolvimento de modelos específicos.

Metalurgicamente separações gravimétricas podem ser descritas por curvas de partição ou de lavabilidade. Os modelos devem ser capazes de predizer os parâmetros de tais curvas, em função das condições operacionais ocorrendo nos equipamentos de separação.

Os tambores de meios densos, onde predominam granulometrias mais grosseiras de partículas, podem ser simulados, conhecendo-se as influências da densidade e da viscosidade do meio denso sobre o desempenho e a eficiência do processo de separação.

Já os ciclones de meio denso são mais difíceis de simular devido à presença de granulometrias mais finas. Os modelos adotados utilizam o conceito de que as curvas de partição têm um ponto comum característico, cujas coordenadas são definidas pelas condições operacionais observadas no ciclone.

#### **2.1.7 - Separações magnética e eletrostática**

Os modelos utilizados atualmente com sucesso para simulação de separações magnética e eletrostática lançam mão de conceitos fundamentais ou teóricos.

Há poucos exemplos na literatura de aplicação prática de simulações de separações magnéticas e eletrostáticas.

### **3 - CASOS PRÁTICOS**

Vários são os simuladores empregados rotineiramente nos trabalhos de Engenharia de Projetos. Entre eles se destacam:

- simuladores de peneiramento e britagem

Na definição dos balanços de massas e fluxogramas de processo, sua aplicação é imprescindível, conjugados a dados práticos de instalações similares e a um julgamento de um

especialista experiente, tais simuladores são ferramentas de grande importância, propiciando uma elevada precisão aos valores simulados;

- simuladores de hidrociclones

Recentemente foi executado um estudo de otimização de um circuito de deslamagem em hidrociclones, consistindo de 3 baterias de 3 estágios cada. O balanço de massas, calculado a partir de análises granulométricas determinadas em amostras coletadas durante a operação, revelou um rendimento de 67,5% em massa. Com o objetivo de maximizar o rendimento de massa. Foram executadas várias simulações, com alterações nos diâmetros de apex e vortex, pressão e também na configuração do circuito. Tomou-se o cuidado de, ao se maximizar o rendimento, não se incorrer na diminuição do nível de qualidade. Como resultado do trabalho foi possível estabelecer as condições nas quais o rendimento atingiria valores próximos de 83%.

- simulação de circuitos de moagem

Alguns trabalhos bem sucedidos com simulação de circuitos de moagem, objetivaram investigar os seguintes assuntos:

- determinar a taxa horária de massa a ser moída no circuito a uma determinada granulometria especificada, quando se alimenta uma tipologia nova de minério;

- determinar as condições do circuito de classificação que maximizem os índices de produtividade e qualidade do circuito de moagem como um todo.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - **Finch, J. A. and Dobby, G. S.** - Column Flotation. Pergamon Press, Toronto, 1990.
- 2 - **Linch, A. J.; Napier-Munn, T.J. and Morrison, R. D.** -Simulation in Mineral Processing - The Present and the future, III Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, São Lourenço, MG, Brazil - Sept. 1992.
- 3 - **Mckee, D. J. and Napier-Munn, T. J.** - The Status of Comminution Simulation in Australia; Minerals Engineering, Pergamon Press, Vol. 3 nr. 1/2, pp. 7-21, 1990.
- 4 - **Lynch, A. J., Mineral Crushing and Grinding Circuits** - Their Simulation, Optimisation, Design and Control, Elsevier, Amsterdam, 1977.
- 5 - **Arterburn, R. A.** - The Sizing and Selection of Hydrocyclones In: Design and Installation of Comminution Circuits, SME-AIME, 1982, pp 592-607.
- 6 - **Plitt, L. R.** , A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier, CIM Bulletin, Vol. 69, 1976.
- 7 - **Herbst, J. A.; Grandy, G. A. and Furstenau, D. W.** - Population Balance Models for the Design of Continuous Grinding Mills, Proceedings, Int. Min. Proc. Congress, 10 th, pp. 23-45, 1973.
- 8 - **Plitt, L. R. and Flintoff, B. C.** - The SPOC Manual, Unit Models and Fortran Simulators of Ore and Coal Process Equipment - Chapters 5, 5.1, 5.2 - Canmet, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1985.