

SISTEMAS AVANÇADOS DE OTIMIZAÇÃO E CONTROLE NA ÁREA DE BENEFICIAMENTO MINERAL

Alexis P. Yovanovic

Eng. Civil-Químico, Universidad Católica del Norte, UCN (Chile, 1973)

MODELO OPERACIONAL – Otimização e Controle de Processos

Rua Califórnia, 281/103, Bairro Sion, CEP 30315-500, Belo Horizonte (MG), Brasil

E-mail: ayovanovic@uai.com.br

RESUMO

Descreve-se uma nova estratégia de controle avançado para as operações de beneficiamento mineral. O sistema propõe a integração de uma estratégia fenomenológica de otimização, desenvolvida utilizando os conceitos do *Modelo Operacional* (Yovanovic, diversas referências), com instrumentos virtuais desenvolvidos a partir de ferramentas de inteligência computacional. A estratégia otimizante é fenomenológica, embutida no sistema de controle, de modo que as técnicas de Inteligência Computacional são utilizadas como apoio à engenharia de processos.

O *Modelo Operacional* considera uma analogia entre os processos químicos de transferência de massa (processos moleculares) e as operações de beneficiamento mineral, baseadas na transferência de partículas minerais, configurando uma nova abordagem fenomenológica para estas operações. Os sistemas otimizantes gerados a partir desta nova filosofia, consideram a integração de diversos subsistemas: acompanhamento de alguns distúrbios de entrada, performance do fenômeno fundamental que acontece na operação unitária em estudo (principalmente Cinética e Seletividade), características físicas do circuito (equipamentos, layout, tempo de residência) e, fundamentalmente, a atuação operacional sobre a usina (interferência do operador nas ações de transferência de massa). O software de controle apresenta, na tela de interface na sala de controle, um “mapa” metalúrgico do circuito, ilustrando onde o processo esteve, para onde deve ir (patamar otimizado) e onde ele está, exatamente agora, em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Avançados de Controle de Processos; Otimização de Processos

ABSTRACT

The paper describes a new strategy of advanced process control systems (APC) for mineral processing operations. The system considers the integration of a phenomenological strategy, developed using concepts of the “*Modelo Operacional*” (Yovanovic, several references), with virtual instruments, developed from computational intelligence tools. The optimizing strategy is phenomenological, embedded in the control system, and the Computational Intelligence techniques are used as support to the engineering process.

The “*Modelo Operacional*” considers an analogy between chemical mass transference processes (molecular processes) and mineral processing operations, based in the mineral particle transference, configuring a new phenomenological approach for these operations. The optimizing systems generated from this new philosophy consider the integration of many subsystems: feed disturbances, the basic phenomenon performance - that happens in the unit operation on study (mainly Kinetic and Selectivity), physical circuit characteristics (equipment, layout, residence time) and, basically, the operational plant performance (operator interference in mass transference actions). The control software presents, in the control room, a "metallurgic map" of the circuit, illustrating where the process was, where it must go (optimized platform) and where it is, accurately now, in real time.

KEY-WORDS: Advanced Process Control Systems (APC); Process Optimization

1. INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas Avançados

Existem avanços tecnológicos na área de otimização e controle de processos, advindos pelo PC, que têm sido aplicados com sucesso em diversas áreas industriais (química, óleo&gás, metalurgia e petroquímica, principalmente), mas não assim nas operações de beneficiamento mineral. Neste trabalho se discute sobre as potencialidades de aplicação destes conhecimentos, as causas do seu insucesso na área mineral e são propostas algumas soluções.

A atividade mineral, como negócio, está cada vez mais acima do chão de fábrica, agrupada em grandes corporações globais e, ainda, com reflexo econômico e financeiro nas bolsas de valores. Nestes últimos anos, também, os preços dos metais básicos estão bem acima dos custos de operação, de modo que as decisões do negócio extrapolam a simples operação nas instalações produtivas e recaem hoje principalmente na gestão comercial, estratégias de mercado e em políticas corporativas ligadas à opinião pública e dos acionistas, como a destinação dos rejeitos, o cuidado sobre o meio ambiente, a qualidade da gestão e o uso racional de água e energia.

No campo da engenharia elétrica, particularmente na área de automação e controle, a intensificação do uso dos PCs e da internet e o desenvolvimento de modernos instrumentos de medição e controle de processos, em tempo real, permitiram uma rápida e eficiente movimentação de algumas informações do processo, através de sistemas como o PIMS, e a geração de plataformas gerenciais de informação, como o MES (Manufacturing Execution System) e o ERP (Enterprise Resource Planning). “*A automação rompeu os grilhões do chão de fábrica e buscou fronteiras mais amplas, se abrangendo a automação do negócio*”, como comentado por Constantino Seixas Filho (1998). De forma similar à engenharia de processos, a automação enfrentou também os seus próprios mitos, feudos de fabricantes e o engessamento dos sistemas de automação e controle, mas conseguiu incorporar as modernidades tecnológicas do mundo digital utilizando soluções cada vez mais genéricas, inclusive com protocolos de comunicação baseados na internet. Esta modernidade está agora à disposição das empresas mineradoras.

1.2 Engenharia de Processos Minerais

Lamentavelmente, isto não tem acontecido na área de engenharia de processos minerais, mesmo com toda a ajuda recebida da automação, através de sistemas especialistas, instrumentação virtual, lógica difusa e outras aplicações, onde é possível transformar em informação digital até algumas práticas corriqueiras de operadores experientes, com base na cor da espuma, o barulho do moinho, etc. Com tudo, o negócio mineral ainda não está efetivamente “na mão” das pessoas que decidem sobre o negócio. De fato, após de 100 anos de intensa utilização industrial de operações unitárias como moagem e flotação, por exemplo, a engenharia de processos minerais depende ainda de poucos fabricantes, de tabelas inseridas em manuais, de mitos tecnológicos e dos mais diversos paradigmas, que tem inibido a incorporação das novas tecnologias de controle e que **mantém o negócio mineral ainda preso aos grilhões do chão de fábrica**, dificultando então o gerenciamento dinâmico do negócio mineral nas plataformas mais altas das corporações.

Até os dias de hoje, nem as empresas de engenharia de projetos, nem as próprias mineradoras, nem as empresas fabricantes de equipamentos, nem as empresas desenvolvedoras de software - com programas ditos avançados para a área mineral, conseguem responder satisfatoriamente às necessidades mais básicas que o negócio mineral espera resolver mediante sua engenharia de processos:

- PROJETO: dimensionamento otimizado e scale-up de equipamentos industriais; definição do arranjo otimizado para o circuito; redução de investimentos; rapidez e confiabilidade no start-up das instalações, etc.
- OPERAÇÃO: dados de processo (teores, granulometrias, etc.) confiáveis e coerentes com o princípio de conservação da massa; estabilidade dos resultados metalúrgicos; simplificação operacional dos circuitos sem perdas de performance; redução da influência de distúrbios de entrada, etc.
- CONTROLE: geração de informação on-line dos KPIs (Key Performance Indicators) mais importantes do processo; operação e controle otimizando dos circuitos, ainda em tempo real; redução de custos operacionais; maximização da produtividade; maximização da performance metalúrgica, etc.

O conhecimento ou “inteligência” latente que está à disposição das usinas de mineração, mas sem ainda ser utilizada integralmente, representa uma enorme potencialidade de riqueza. Em parte, os sistemas avançados de otimização e controle não têm funcionado adequadamente na área mineral porque não possuem o correto equilíbrio entre o conhecimento que vem das pessoas (modelos físicos, experiência prática e estratégias de controle) e o conhecimento que surge dos dados do processo (identificação de sistemas e modelagem empírica), como veremos a seguir.

2. IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE PROCESSOS

O sucesso obtido pelos sistemas avançados de otimização e controle nas áreas: química, óleo&gás, metalurgia e petroquímica, deve-se fundamentalmente ao fato de que estes processos utilizam a transferência molecular de massa entre as fases. As operações de beneficiamento mineral transferem “partículas” minerais, normalmente heterogêneas e de alta variabilidade de conteúdo. As partículas não obedecem leis de difusão, com procura natural de equilíbrio e estabelecimento de gradientes definidos de transporte, mas devem ser “forçadas” mediante aplicação externa de energia, para elas avançarem numa determinada direção e num determinado ritmo, ao compasso do “operador” e não de leis internas e moleculares. Baseado nesta observação foi desenvolvido o *Modelo Operacional* e a teoria da *Transferência Macromolecular de Massa* (Yovanovic, diversas referências), que auxilia ao operador para conduzir de forma otimizada estas partículas, permanentemente, ou seja, da forma que a natureza as “obrigaria” se elas fossem moléculas.

2.1 Representação Fenomenológica dos Processos Minerai

Somado ao indicado em parágrafo anterior, os processos de beneficiamento mineral são também muitíssimo complexos, e apresentam sérias dificuldades para serem encapsulados empiricamente, com base em representações do tipo “caixa preta”. Na **Figura 1** é ilustrada uma representação fenomenológica dos processos de beneficiamento mineral, da forma sugerida pela teoria de *Transferência Macromolecular de Massa*:



Figura 1 – Representação Fenomenológica dos Processos Minerai

A modelagem física dos processos minerai é uma atividade muito difícil, tanto pelas características das partículas minerai alimentadas ao sistema, como pela própria complexidade do sistema fenomenológico. Também, pela variabilidade de ocorrência destes processos, sem respeitar gradientes nem estado estacionário, as linhas avançadas de modelagem procuram representar a dinâmica do processo, mediante complicadas equações diferenciais, que têm resultado em alternativas pouco efetivas na aplicação industrial. Em soma, falta “simplicidade” nas abordagens fenomenológicas e faltam respostas de engenharia de processos frente às necessidades atuais das empresas mineradoras.

2.2 Otimização dos Processos Minerai

Considerando as características do minério alimentado ao circuito, a aplicação da energia (campo magnético, cominuição, hidrofobia, etc.), a ocorrência do fenômeno fundamental, os distúrbios operacionais, a qualidade da operação, a capacidade, arranjo e tempo de contato oferecido ao minério por parte das instalações físicas de processamento, entre outros aspectos, pode-se concluir que a otimização de um processo possui várias fases, e é bem mais ampla que o conceito envolvido nas abordagens meramente empíricas, que tentam resolver apenas a última fase do sistema geral de otimização, como ilustrado na **Figura 2** a seguir.



Figura 2 – Sistema Geral de Otimização de Processos Minerai

2.3 Modelos Empíricos

Os processos que envolvem transferência molecular de massa podem ser razoavelmente representados em sistemas de identificação do tipo “caixa preta”, mediante técnicas estatísticas e de inteligência computacional, inclusive alguns processos familiares para os engenheiros de processamento mineral, como a Lixiviação, a Extração com Solventes e outros tem sido implantados sistemas avançados de controle, com relativo sucesso, inclusive mediante técnicas puramente estatísticas de identificação.

Por outro lado, os processos com transferência de partículas minerais: a) devem utilizar fontes externas de energia para “forçar” o transporte, b) dificilmente atingem a condição de Estado Estacionário e, ainda, c) apresentam problemas físicos de origem rústico e imprevisível (entupimentos de chutes de transferência ou de ciclones, sedimentação súbita de polpa em calhas e células, etc.). Na **Figura 3** são ilustrados ambos os tipos de processos.

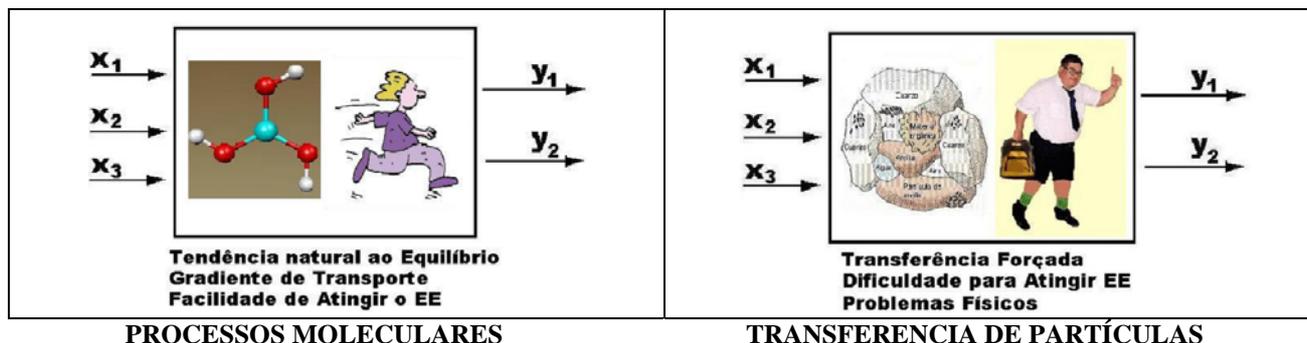


Figura 3 – Modelos Empíricos de Modelagem

Em geral, as operações de processamento mineral, ao invés de simplificar as operações e procurar atingir condições próximas às observadas nos processos moleculares, tendem a complicar-se, exagerando na recirculação de fluxos, tanto dentro da mesma operação unitária como entre operações unitárias diferentes, dificultando ainda mais a representação do sistema, que dificilmente atinge o estado estacionário. Enquanto 100 toneladas avançam pelo fluxo principal, centenas de toneladas voltam para trás, nas cargas circulantes, de modo que o processo fundamental é escondido dentro de caixas pretas, de onde saem um produto e um rejeito, na habilidade do “operador”, e em fluxo oscilante e normalmente fora do estado estacionário dentro dos períodos de avaliação e acompanhamento (turno, bi-horária, etc.).

A forma de visualizar o processo deve ser necessariamente em estado estacionário. Por exemplo, na validação metalúrgica do balanço, mediante amostragens e análises químicas, o “fechamento” do balanço utilizando os teores de alimentação, concentrado e rejeito só faz sentido quando o sistema está em estrito estado estacionário, de modo que a percepção física da massa e o conteúdo de substância estão na mesma base de avaliação. Não é estranho, em certas usinas, observar recuperações acima de 100% ou até mesmo negativas, por causa do acúmulo ou do desafogo de material em determinados períodos. Sistemas especialistas de otimização e controle, ou sistemas avançados com modelagem empírica, que operam com base naqueles dados de processo, detectam estas irregularidades como sendo “ruídos” do sistema, originados no input, e não questionam a qualidade da operação e a geração desses dados.

O sistema gerencial dessas informações também entende que a usina deve cumprir as leis de conservação da massa, daí a utilização de softwares com sistemas reconciliadores, com base em polinômios de Lagrange, e detectando “erros” que são atribuídos aos instrumentos, às análises químicas, etc., mas não à operação da usina. **Então, porque não operar as usinas já em Estado Estacionário e gerar informação correta aos sistemas de controle, ainda em tempo real?**

2.4 A Proposta do Modelo Operacional

Basicamente são duas as recomendações sugeridas:

1. O operador deve manter, permanentemente, o processo próximo do Estado Estacionário (o arranjo deve colaborar nesta direção). Desse modo, os modelos fenomenológicos poderiam ser apenas estáticos e representados por simples equações algébricas, gerando ainda saídas confiáveis no “output” do sistema;
2. Com o processo sob controle e acompanhando a performance em tempo real, o modelo (de otimização) deve indicar o caminho e o Ponto de Operação a ser seguido pelo fluxo principal de massa. Deve-se **otimizar** e não apenas **simular** os tortos caminhos do minério. **Com a usina na sua mão você manda e o minério obedece.**

3. O MODELO OPERACIONAL

O *Modelo Operacional*, que vem sendo desenvolvido pelo Autor deste trabalho a partir de 1987, estabelece uma analogia com os processos químicos de transferência de massa, apresentando uma nova interpretação fenomenológica para os processos minerais: a *Transferência Macromolecular de Massa*, que modela diversos processos de tratamento de minérios na perspectiva macromolecular (partículas, grãos), porém, da forma como são estudados os processos moleculares da engenharia química, ou seja: **Como as partículas agiriam se elas fossem moléculas?** Conhecendo esta condição, o operador pode atuar sobre o circuito “induzindo” o fluxo mássico sob esta importante orientação.

O *modelo* não simula condições aleatórias de processo, mas define o caminho ótimo dele, ou seja, é um modelo de otimização e não de simulação. Estabelecendo a analogia com os processos moleculares, o modelo passa, numa segunda fase, a identificar o fenômeno real que deve ser estudado e extrapolado para as operações industriais, que consiste numa combinação entre o fenômeno fundamental (submetido à aplicação de energia), os mecanismos de transporte e a função de retirada do produto, como ilustrado na Figura 1. O terceiro passo é definir a propriedade macrofenomenológica que será utilizada no dimensionamento e scale-up. Na **Figura 4** são ilustradas as leis matemáticas do *Modelo Operacional*.



Figura 4 – A Estrutura do Modelo Operacional

- **1ª Lei:** Define a propriedade macrofenomenológica e o scale-up para a operação industrial. **Aplicações:** Avaliação em laboratório; rotinas de “scale-up”; dimensionamento dos equipamentos.
- **2ª Lei:** Expressão matemática que descreve o processo em estado estacionário, em função de todas as etapas envolvidas com o fluxo principal, chamada de *Equação de Continuidade*. **Aplicações:** Avaliação geral / diagnóstico da usina; controle preciso dos operadores sobre a usina; identificação de problemas operacionais.
- **3ª Lei:** Equação matemática que expressa a condição ótima para o processo, Chamada de *Equação de Otimização*. **Aplicações:** Máxima capacidade e/ou mínimo custo de operação; melhores resultados metalúrgicos; sistemas especialistas de controle; estabilidade operacional.

Se a usina fosse como uma cidade e as ruas fossem as opções do fluxo, poderíamos imaginar um processo mineral como o transporte de massa por aquela cidade, de um extremo a outro, onde as partículas são transportadas por um carro A partir do laboratório, pode-se definir o combustível mais conveniente, o modelo do carro, condição de combustão, calibragem de pneus, etc. (1ª Lei), além disso, até um modelo de tempo de demora para o percurso pode ser estimado, definindo a velocidade média do carro num trajeto teórico (estudo cinético empírico). Mas, após enviar o carro, devemos esperar no laboratório até o motorista voltar e informar os resultados reais do percurso, onde o modelo será confrontado na sua predição e, se os resultados fossem ruins, se poderá culpar ao combustível ou o carro, etc., mas sem considerar o percurso que o motorista seguiu, de modo que para cada viagem poderemos ter um resultado diferente. Os **modelos físicos** pretendem fazer o mesmo, apenas que por controle remoto, sem motorista, controlando a marcha do carro desde o laboratório, mas ainda sem conhecer a melhor opção para o trajeto.

O *Modelo Operacional* consegue interpretar o mapa da cidade (2ª Lei) e definir o caminho mais conveniente (3ª Lei - o mais próximo da linha reta), e orientar o motorista (operador) para seguir essa rota, como ilustrado na **Figura 5**. Os resultados sempre serão ótimos, comparáveis e padronizados, para qualquer combustível (o consumo será mínimo) ou carro escolhido, ou para qualquer outra variável devida ao minério que possa ser estudada no laboratório (fenômeno natural). Cada minério é um minério, mas, da mesma forma, cada operação unitária é uma operação unitária, e esta deve ser otimizada, qualquer que seja o minério processado. Os minérios, pela sua característica, poderão apresentar bons ou maus resultados, mas **sempre devem ser bem processados pelo operador**.



Figura 5 – Exemplo Conceitual de Aplicação do *Modelo Operacional*

4. CAMPO DE ATUAÇÃO NAS EMPRESAS MINERADORAS

Uma equipe multidisciplinar, especializada na otimização e controle de processos minerais, poderia ocupar hoje um interessante espaço dentro das empresas mineradoras, percorrendo o caminho indicado na **Figura 6**, que inclui desde o desenvolvimento de novas tecnologias até a alimentação de informações para os sistemas gerenciais da empresa.

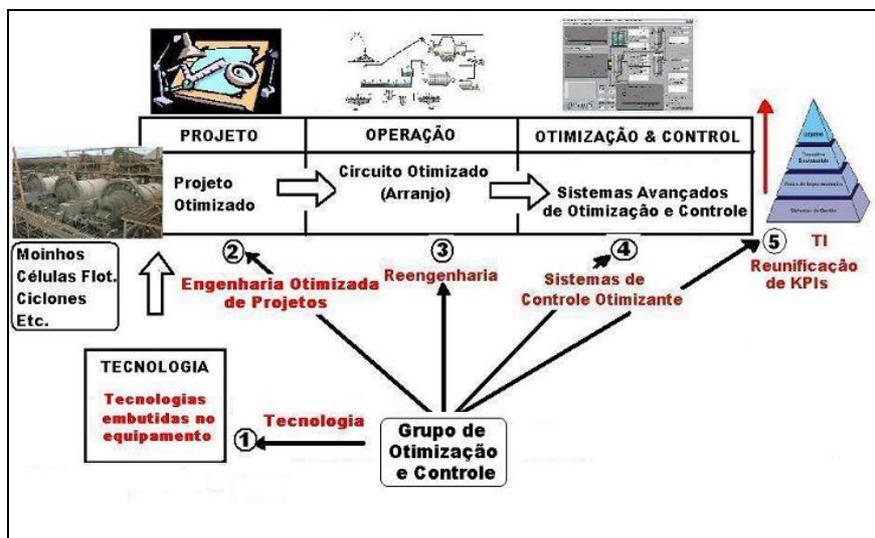


Figura 6 – Campo de Atuação nas Empresas Mineradoras

4.1 Novas Tecnologias

Uma *Equipe de Otimização e Controle*, multidisciplinar (engenheiros de processo com apoio de outras especialidades), com prática operacional e experiência na implantação de sistemas avançados, poderia detectar as necessidades e problemas que os projetos e usinas convencionais apresentam na sua origem, derivando isto em conhecimentos que podem ser traduzidos em tecnologias a serem introduzidas já no equipamento e no seu sistema de controle. Estas novas tecnologias poderiam acabar com muitos dos atuais paradigmas; reduzir os investimentos; fomentar a fabricação local e padronizada de equipamentos; limitação dos atuais critérios de “gigantismo”; critérios simples e eficientes de scale-up; dimensionamento otimizado, etc.

4.2 Engenharia Otimizada de Projetos

Estabelecimento de critérios otimizantes já na execução e/ou revisão de projetos de engenharia, ainda na sua etapa conceitual ou básica: incorporando as novas tecnologias; proporcionando maior segurança operacional e garantia de qualidade; suporte para sistemas avançados de controle automático; acompanhamento on-line das operações principais; redução significativa do *capex*; simplificação dos arranjos / circuitos abertos; estabelecimento de independência de operação e controle entre as operações unitárias; redução da influência de distúrbios; rapidez do start-up, etc.

4.3 Otimização Operacional de Circuitos - Reengenharia

Reengenharia de usinas existentes, otimização do fenômeno natural, do arranjo do circuito e das práticas de operação. Utilizando critérios avançados, as usinas podem ser devidamente otimizadas, de acordo ao esquema ilustrado na Figura 2. O fenômeno natural deve ser estudado no laboratório, para determinar a “potencialidade” que o minério oferece e as necessidades efetivas da operação unitária em quanto à performance. A operação, como antes indicado, deve manter o fluxo principal de massa dentro do estado estacionário.

Com respeito ao arranjo, é possível demonstrar, junto com a aplicação da 2ª Lei do *Modelo Operacional*, que existe um arranjo ótimo para cada processo, como ilustrado no exemplo da **Figura 7**, na flotação de quartzo numa usina de concentração de finos de minério de ferro. A equação de continuidade de cada arranjo, deduzida pelo *Modelo Operacional*, e que expressa a eficiência (recuperação) do circuito total em função da eficiência individual de cada uma das etapas envolvidas, mostra que, no exemplo apresentado, para o arranjo atual, o 2º Rougher não atua em favor da concentração, mas apenas na geração de carga circulante, que pela sua parte prejudica o tempo de residência e a altura da camada de espuma do fluxo principal, obrigando a um maior esforço ao primeiro Rougher.

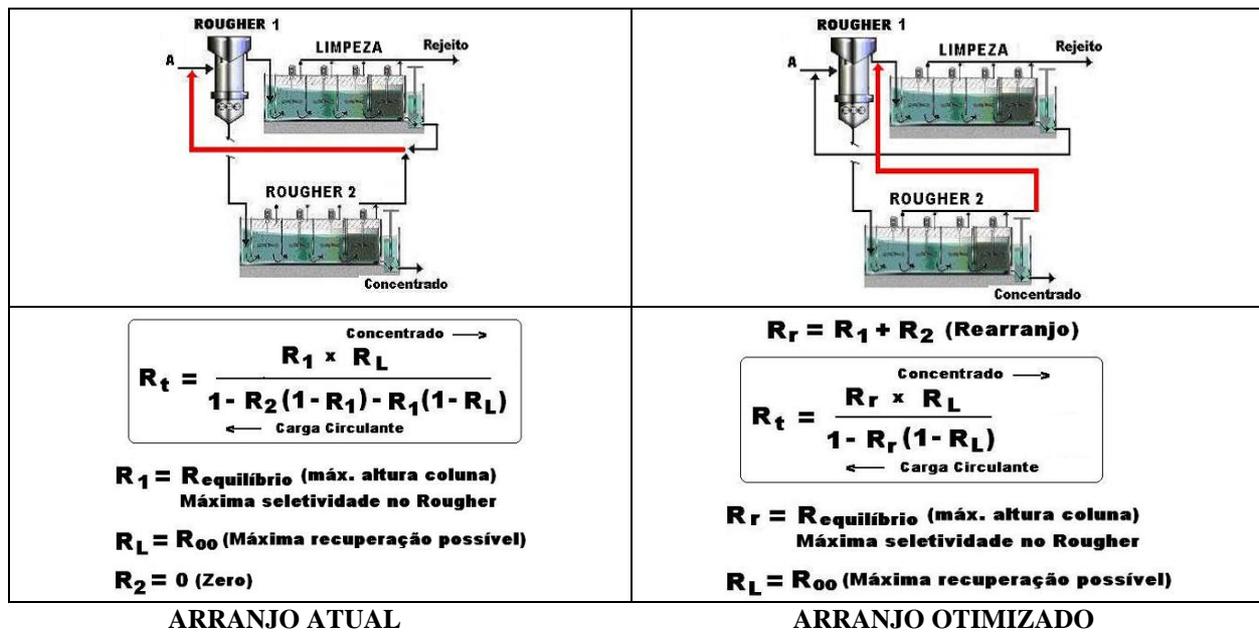


Figura 7 – Estudo de Arranjo de Circuito de Flotação

4.4 Sistemas Avançados de Otimização e Controle – Aplicação em Circuito de Flotação

O circuito analisado consiste de três colunas de flotação em arranjo conforme a Figura 8, onde se destaca a existência de uma carga circulante entre a etapa de *Rougher* e de limpeza de espuma. O sistema também considerou a hipótese de operar sem a etapa Scavenger, e assim foi testado (Yovanovic, Carvalho, de Castro e outros, 2006-2007).

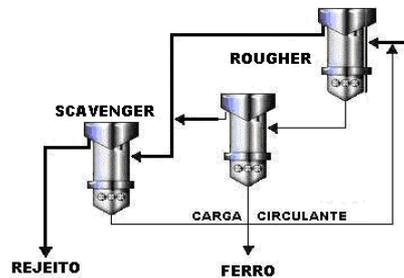


Figura 8 – Layout do circuito de flotação com limpeza de espuma (Scavenger)

Em parceria com a empresa Arte&Byte Sistemas, de Belo Horizonte, por meio de ferramentas de *Data Mining* para análise estatística e pela visão de engenharia de processos das variáveis disponíveis na base de dados, foi possível estabelecer um modelo empírico para a estimativa da concentração de massa do circuito. O valor estimado de concentração de massa (R_{cm} = Massa Alimentada/Massa Flotada) é dado por uma Rede Neural Artificial que representa uma regressão multivariada não-linear. Esta regressão, gerada a partir da base de dados físicos de processo, fornece um valor contínuo de concentração de massa. Desta forma, o modelo desenvolvido realiza uma caracterização contínua do processo com base na curva de seletividade do circuito.

De posse da informação desta grandeza em tempo real, o *Modelo Operacional* é capaz de realizar o balanço mássico e metalúrgico do circuito bem como direcionar as atitudes operacionais de movimentação de massa, como por exemplo, a manipulação das válvulas de descarga para alcançar pontos ótimos de operação. Os pontos ótimos a serem alcançados são apresentados no mapa de operação (Curva de Seletividade), bem como o ponto de operação atual do processo e a representação do resultado da última bihorária. O mapa metalúrgico utilizado no sistema é constituído pela Curva de Seletividade Média da separação de sílica do minério de ferro, segundo a 1ª Lei do *Modelo Operacional*, para o circuito em questão. O ponto ótimo de operação é dado dinamicamente em função do teor de sílica objetivo no concentrado (1,5%) e do teor de sílica na alimentação, também estimado pelo sistema otimizante.

A diferença da localização do ponto de operação e o ponto ótimo atual é utilizada para a geração de atuações para que o sistema real se aproxime de sua condição otimizada no período avaliado (bi-horária). Estas atuações são representadas por alterações de dosagem de reagentes, aberturas de válvulas de descarga, adição de água (no caso do circuito que inclui a etapa Scavenger), dentre outras, conforme ilustra a Figura 9 que representa a interface do software.

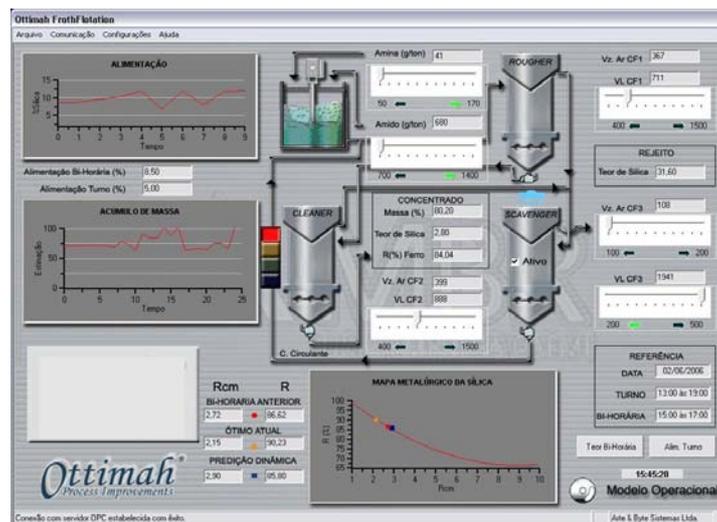


Figura 9 – Interface de operação do software *iFLOT*.

Além de promover a otimização dos resultados metalúrgicos através de sugestões de operação, foram atribuídas ao sistema outras funcionalidades relevantes para a manutenção do processo próximo do estado estacionário, como o acompanhamento do acúmulo de massa dentro do circuito e a estimativa de teor de sílica da alimentação. A modelagem do processo de flotação possibilita a geração de um balanço *on-line* dos resultados metalúrgicos, representado pela estimativa dos teores de sílica no rejeito e concentrado, e recuperação mássica e metalúrgica de ferro. Num teste industrial de 36 horas de duração foi possível observar uma “potencialidade” (caso o sistema operasse 100% no Ponto Ótimo) de 9% de maior recuperação de ferro, além de uma significativa redução no consumo de reagentes.

5. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma nova metodologia para o controle otimizador de processos e as potencialidades de aplicação desta tecnologia nas distintas fases de projeto e de operação de usinas industriais na área de beneficiamento mineral. Destaca-se a originalidade da abordagem proposta e a utilização das mais modernas tecnologias de inteligência computacional e de engenharia de processos. Recomenda-se, nas empresas mineradoras, a criação de grupos de Otimização e Controle.

6. REFERÊNCIAS

- Yovanovic, A.P. Uma Nova Abordagem à Tecnologia Mineral: O Modelo Operacional, *Revista Minérios*, **167**, p.26-33, 1991.
- Yovanovic A.P. e Moura H.P. A New Macrophenomenological Concept of Comminution in Balls Mills. In: XVIII International Mineral Processing Congress, Sidney, Australia, p.1363-1368, 1993.
- Seixas Filho C. A. Automação nos Anos 2000 – Uma Análise das Novas Fronteiras da Automação. ATAN Sistemas, 1998
- Yovanovic A.P. Engenharia da Concentração de Massa por Flotação – Volume 1: Fundamentos da Flotação, A.P. Yovanovic (editor), Belo Horizonte, Brasil, 300 p., 2004.
- Yovanovic A.P. & Drumond M.R. Flotation as an Operation of Macromolecular Mass Transfer. In: Centenary of Flotation 2005 Symposium, Brisbane, Australia, pp. 651-657, 5-9 June 2005.
- Yovanovic A.P. Macromolecular Mass Transfer: A New Approach for Mining Process Unit Operations. In: XXIII International Mineral Processing Congress, Istanbul, 3-8 September 2006.
- Yovanovic A.P. Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares, Yovanovic A.P. (editor), Belo Horizonte, Brasil, 400 p., 2006.
- Yovanovic A.P., Carvalho D.H.D., de Castro E.B., Ribeiro F.S., Felipe E.A., Marinho E. & Rezende F. Modelagem e Otimização de um Processo de Flotação Utilizando Ferramentas de Inteligência Artificial. In: X Seminário de Automação de Processos da ABM, Hotel Ouro Minas, Belo Horizonte, 04 a 06 de outubro 2006.
- Yovanovic A.P. Transferencia Macromolecular de Masa: Aplicación para Optimización de Circuitos de Flotación. In: PROCEMIN 2006, IV Taller Internacional de Procesamiento de Minerales, Santiago, Chile, Nov. 22 - 24, 2006.
- Yovanovic A.P. La Cominución como una Operación de Transferencia Macromolecular de Masa. In: PROCEMIN 2006, IV Taller Internacional de Procesamiento de Minerales, Santiago, Chile, Nov. 22 - 24, 2006.
- Yovanovic A.P., Araújo A.C., de Castro E. & Carvalho D.H.D. Modelo Operacional and Computational Intelligence: A New Approach to Mineral Processong Optimization, In: APCOM 2007, Santiago, Chile, April 24-27, 2007.