

SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA CONTROLE DE PROCESSO¹

Utilização de simulação dinâmica como auxílio no controle de processos minerais - Uma aplicação no controle de moagem e flotação de minério de Ferro

Flávio José da Silva Carvalho²
Marco Aurélio Soares Martins³
Mônica Guimarães Vieira⁴
Gabriel Guimarães Ferreira⁵
Cezar Gonçalves da Silva⁶
Elismar Miquelanti⁷

Resumo

O objetivo deste projeto foi utilizar a simulação dinâmica e informações medidas do processo, para obter outras informações importantes de uma usina de moagem e flotação de minério de ferro. Estas informações importantes, como a granulometria do produto da moagem e as vazões das cargas circulantes, são fundamentais para o bom controle da usina, e não são medidas por falta ou deficiência de instrumentos. O simulador dinâmico utilizado consiste de um software de simulação estática externo, com modelos matemáticos que descrevem o processo, que é manipulado por um *software* com sistema especialista, capaz de comunicar com este simulador. O sistema especialista recebe informações do processo, como vazões, densidades, equipamentos em operação e resultados do laboratório. Estas informações depois de filtradas e tratadas são utilizadas para calcular os parâmetros dos modelos matemáticos utilizados no simulador externo. Após rodar o simulador, as informações detalhadas dos fluxos são enviadas ao sistema especialista que as compara com as informações existentes do processo, caso esteja dentro de uma margem aceitável de erro as informações de interesse são enviadas ao sistema de controle avançado de processo, caso contrário o sistema especialista altera os parâmetros dos modelos utilizando regras com lógica *fuzzy/crisp*. O sistema está fornecendo informações importantes dos diversos fluxos para o controle, em especial na moagem onde o medidor online de granulometria falha constantemente.

Palavras-chave: Simulação; Simulação dinâmica; *Soft sensor*; Controle de processo.

DYNAMIC SIMULATION FOR PROCESS CONTROL

Use of dynamic simulation as an aid in control of mineral processes - An application to control the milling and flotation of iron ore

Abstract

The objective of this project was to use dynamic simulation and information measured from the process in order to obtain other important information from a mill grinding plant and flotation of iron ore. This important information such as the product of grinding granulometry and the flow of circulating loads are essential to good plant control, and are not measured by the absence or deficiency of instruments. The dynamic simulator used consists of external static simulation software with mathematical models that describe the process, which is handled by an expert system software, able to communicate with this simulator. The expert system receives information from the process, such as flow rates, densities, operating equipment and laboratory results. This information is then filtered and processed to be used for calculating the parameters of the mathematical models used in the external simulator. After running the simulator, detailed information of flows are sent to the expert system that compares with the existing information of the process and if it is within an acceptable margin of error the information of interest are sent to the advanced process control, otherwise the expert system changes the parameters of the models using fuzzy/crisp logic rules. The system provides important information from multiple streams to the control, especially on milling where the granulometry online meter constantly fails.

Key words: Simulation; Dynamic simulation; *Softsensor*; Process control.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro de Processos CEMI Engenharia flavio@cemi.eng.br.

³ Engenheiro de Processos CEMI Engenharia Diretor de Operações - marco@cemi.eng.br.

⁴ Engenheira de Processos CEMI Engenharia monica@cemi.eng.br.

⁵ Engenheiro de Processos CEMI Engenharia gabriel@cemi.eng.br.

⁶ Engenheiro de Processos Vale Timbopeba - cezar.goncalves@vale.com.

⁷ Analista de Processos Vale Timbopeba - elismar.miquelanti@vale.com.

1 INTRODUÇÃO

No controle de processo de plantas de beneficiamento de minério, sofremos constantemente com as falhas ou até mesmo falta de equipamentos de medição. Este projeto foi executado para tentar minimizar este problema na planta de beneficiamento da Vale Timbopeba, no município de Mariana, onde não se conhece a carga circulante do circuito de moagem, informação importante para a adição de água no moinho, por não ter medidor, e não se conhecer a granulometria do overflow da classificação deste circuito, informação de extrema importância para o controle deste circuito, pois impacta no processo subsequente que a flotação onde se obtém o produto final. Apesar de se ter medidor online do retido em 100 mesh deste fluxo, o instrumento encontrasse constantemente em manutenção ou descalibrado.

Para obter ou substituir estas informações importantes para o controle do processo utilizamos uma tecnologia denominada OptSim®. O Optsim consiste de um simulador externo estático de processo, que no caso foi utilizado o Usimpac, que é gerenciado por um sistema especialista que conta com um módulo de comunicação com o simulador externo, estatística condicional, lógica *fuzzy/crisp*, entre outros. O sistema recebe informações do PLC, como massas, vazões, densidades e resultados de laboratório, validam estas informações, enviando entradas ao simulador externo, após a compilação do simulador o balanço de massas é enviado ao sistema especialista que o compara com as informações existentes do processo. Caso o balanço de massas esteja dentro de um erro aceitável, as informações importantes são enviadas para que seja feito o controle de processo, caso esteja fora do erro aceitável o simulador externo altera os parâmetros dos equipamentos até que o balanço esteja dentro do erro.

O OptSim já está implantado para o circuito de moagem de Timbopeba, gerando as informações de interesse, principalmente quando o PSM que mede a granulometria do overflow da classificação falha e esta sendo configurado para o circuito de flotação para se determinar a carga circulante do circuito.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Processo Vale - Timbopeba

Este projeto foi executado no circuito de moagem, deslamagem e flotação da Vale, unidade de Timbopeba, em Mariana-MG.

O circuito de moagem consiste de um moinho e uma bateria de 8 hidrociclones de 26 polegadas de diâmetro. O moinho recebe a alimentação nova de itabirito e o *underflow* dos hidrociclones, o moinho descarrega em uma caixa que recebe também o rejeito de um circuito de separação magnética e da reclassificação de finos. O material desta caixa é bombeado para a bateria de hidrociclones para fazer a classificação em 100 mesh. Neste circuito existem instrumentos para medir a potência do moinho, a massa de alimentação de itabirito, a vazão e a densidade da alimentação dos hidrociclones, a pressão e numero de hidrociclones em operação e o retido em 100 mesh e porcentagem de sólidos do overflow dos hidrociclones. O medidor do *overflow* da classificação constantemente fica descalibrado ou em manutenção, prejudicando o controle da moagem. A Figura 1 ilustra o circuito da moagem.

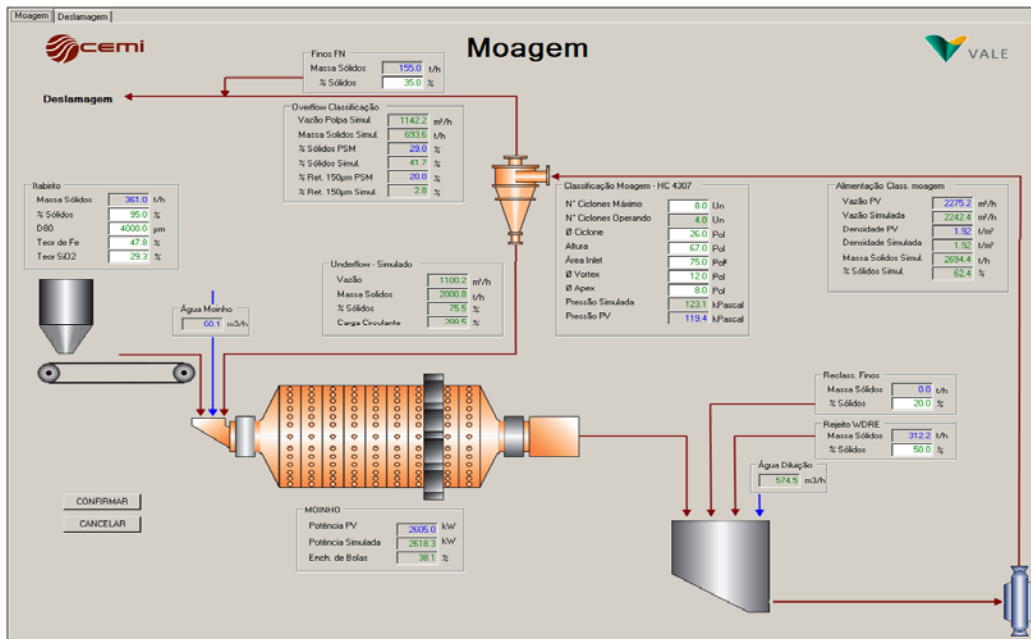


Figura 1. Fluxograma conceitual da moagem.

O *overflow* da classificação vai para o circuito de deslamagem, juntamente com os finos da classificação de outro circuito de classificadores espirais, para alimentar a deslamagem. A deslamagem é realizada em duas linhas duas etapas, em hidrociclones de 20 polegadas e 6 polegadas. Neste circuito são medidas as vazões e densidades das alimentações da primeira etapa de hidrociclones. A Figura 2 ilustra o circuito da deslamagem.

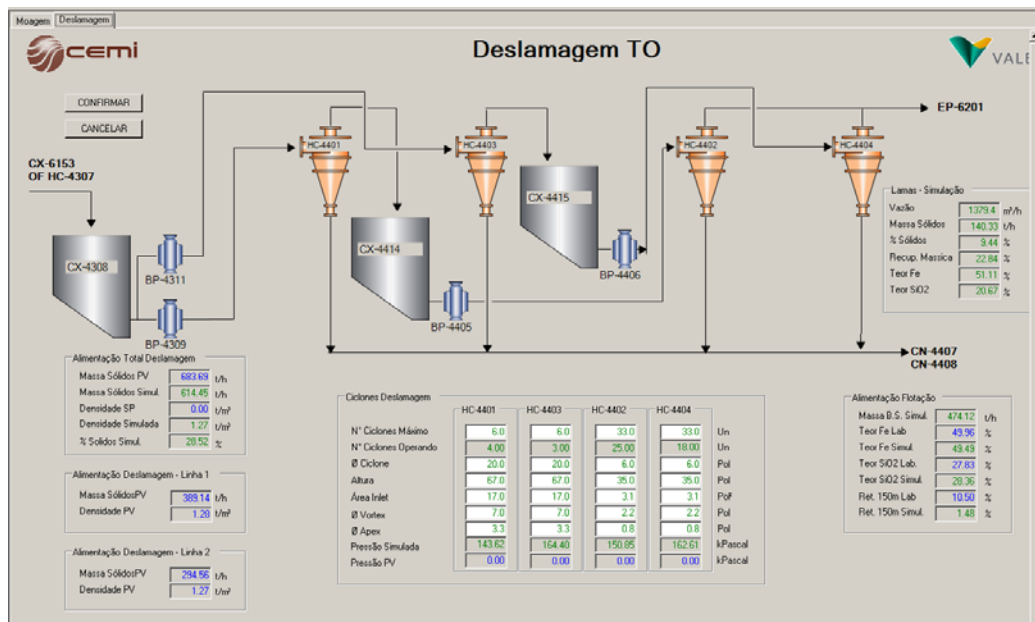


Figura 2. Fluxograma conceitual da deslamagem.

O *underflow* das etapas de deslamagem seguem para o circuito de flotação que consiste de duas linhas com duas etapas rougher, duas etapas cleaner e duas etapas scavenger cada linha. Para a flotação a medição do volume de alimentação das roughers, da velocidade de transbordo das células e resultado de teores e granulometria da alimentação nova e concentrado da flotação. A Figura 3 ilustra o circuito da flotação.

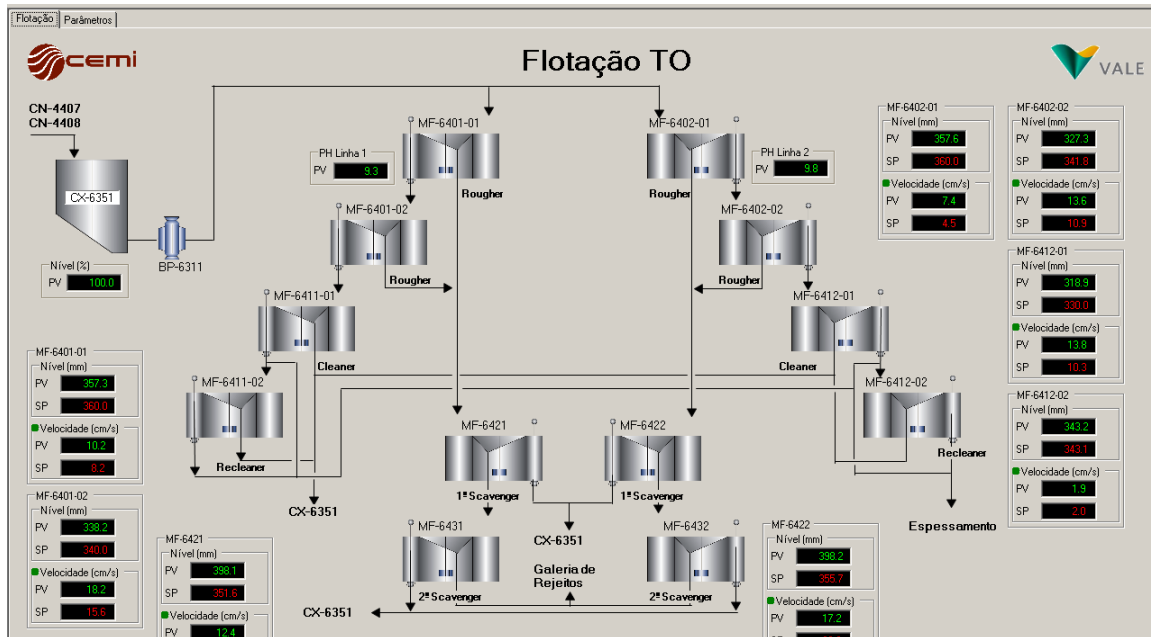


Figura 3. Fluxograma conceitual da flotação.

2.2 OPTSIM – Simulador Dinâmico

OptSim© é um Sistema desenvolvido pela CEMI para simulação dinâmica de processos de beneficiamento mineral, tanto de forma *on-line* quanto *off-line*.

A tecnologia de simulação de processos tem uma ampla aplicação, como em análises de processos existentes e otimizações, projetos de novas usinas, dimensionamento de equipamentos, balanços de massas e até treinamento de operadores. Assim, sua utilização como ferramenta na indústria traz um alto retorno do investimento, além da aquisição do domínio e conhecimento dos processos.

A utilização da simulação dinâmica representa um novo marco no campo da otimização de processos minerais. A possibilidade de simular, utilizando inferências estatísticas, a variabilidade natural dos parâmetros de uma planta, como sua alimentação, conduz a resultados que podem mostrar o horizonte de toda a operação ao longo de um determinado período.

É possível ainda alterar parâmetros que evidenciam a eficiência dos equipamentos, demonstrando seu desgaste com o tempo e até mesmo a retomada de valores normais, após uma parada para manutenção.

O OptSim© é uma ferramenta poderosa e confiável para desenvolvimento de um banco de dados e avaliação do desempenho dos processos. O sistema é formado por:

- um simulador estático externo, que representa a cada momento a realidade da planta;
- um banco de dados, onde são encontradas informações sobre a variabilidade do processo, utilizado como base para a alteração de parâmetros de entrada do simulador estático a cada ciclo, além da importante função de armazenamento de resultados obtidos; e
- uma estrutura com sistema especialista utilizando lógica nebulosa, composta por diversos módulos, sendo os principais os seguintes:
 - gerenciamento de ações;
 - estatística condicional; e
 - sintonia avançada.

A Figura 4 ilustra bem a estrutura do Sistema OptSim©.

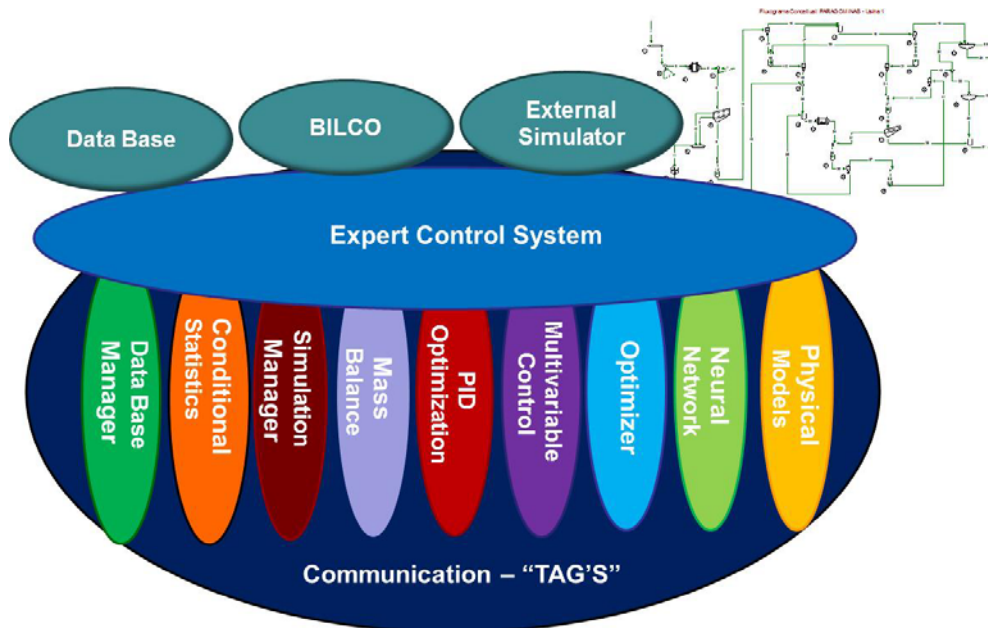


Figura 4. Estrutura do sistema.

O módulo de gerenciamento de ações pode ser configurado para que tome as decisões usualmente tomadas pelos operadores, apresentando um relatório de dados e resultados. Esse relatório indicará o desempenho da planta, assim compreendendo as boas e más práticas de controle do processo.

Alternativamente, boas práticas de controle podem ser testadas utilizando dados obtidos de forma on-line, permitindo a detecção de falhas nos procedimentos atuais e conduzindo a um real conhecimento do processo.

A confiabilidade do sistema se baseia em grande parte na validação dos dados adquiridos para os estudos por simulação. Os valores coletados na planta apresentam erros sistêmicos e/ou aleatórios, que poderiam prejudicar ou distorcer as análises. Utilizando os módulos estatísticos e de gerenciamento, análises criteriosas e correções são inseridas nos dados de entrada, que são desta forma, validados. É importante ressaltar que os dados de entrada utilizados pelo OptSim© podem ser adquiridos diretamente da planta pela implantação de comunicação apropriada, ou mesmo de um banco de dados previamente estruturado, como aqueles fornecidos pelo PIMS.

Outro grande benefício do OptSim© é o módulo de modelos fenomenológicos, que incorporam no sistema a real operação dos processos. Os modelos físicos de cada equipamento permitem sua avaliação detalhada e a realização de testes e análises de diferentes possibilidades ou alternativas a serem implantadas no processo real.

A utilização de modelos estatísticos, como a curva normal, para simulação da variabilidade da alimentação do processo fornece dados importantes que podem ser usados para o planejamento futuro e decisões afins.

O módulo de sintonia avançada, que utiliza o Filtro de Kalman, realiza a adequação automática dos parâmetros do simulador, garantindo sua robustez e confiabilidade.

2.3 Simulador Externo - USIMPAC

O simulador externo utilizado neste projeto foi o *software* Usimpac 3.1, desenvolvido pela Caspeo/BRGM, da França. Inicialmente foi feita uma pré-calibração do simulador com amostragens existentes. Na Figura 5 é apresentado o fluxograma conceitual, elaborado no Usimpac para os circuitos de flotação deslamagem e flotação.

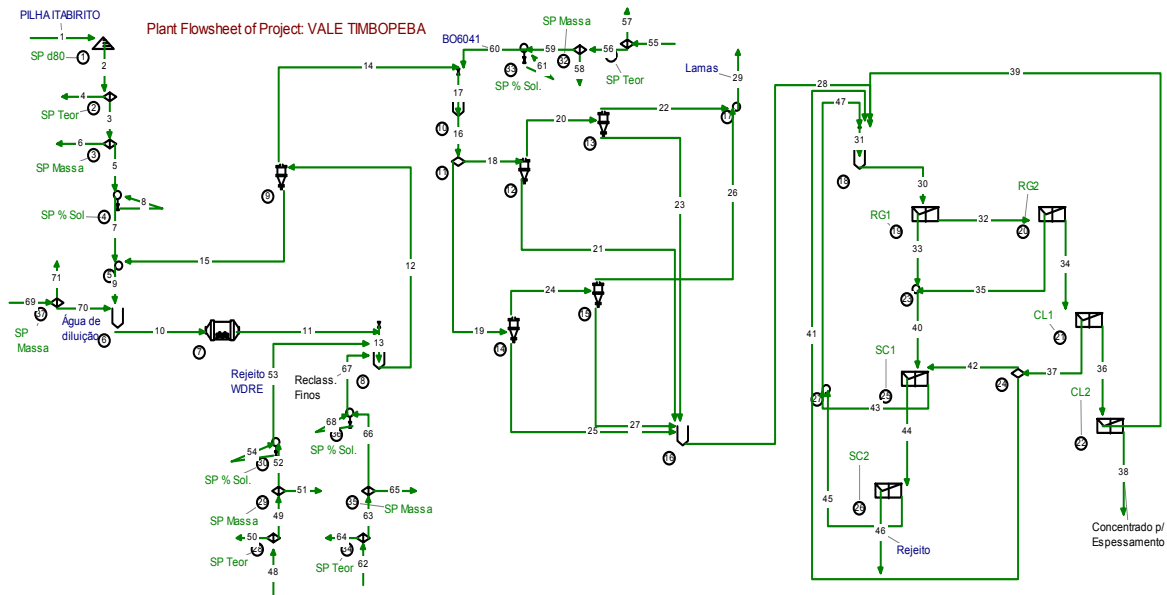


Figura 5. Fluxograma conceitual do Usimpac - Planta de Timbopeba.

Os modelos matemáticos utilizados para representar as etapas de moagem, classificação e flotação estão utilizados a seguir:

Moinho - Para simulação do moinho foi utilizado o modelo do Usimpac 122 - Ball Mill 3. Este modelo combina uma abordagem completa cinética, baseado nos trabalhos de Austin e de Herbst,⁽¹⁾ com uma abordagem energética da moagem. Este modelo leva em conta separadamente a matriz B de quebra e a matriz S de seleção. A matriz de quebra foi modelada com base em amostragem industrial. A matriz seleção é representada por uma função, cujos coeficientes são determinados pelo ajuste linear com base em dados da moagem industrial. Para calcular a energia consumida pelo moinho, em função de suas características, foi utilizada a fórmula empírica usada nos métodos Allis Chalmers para dimensionamento de moinhos.

- **Hidrociclone** – Para a simulação da classificação e deslamagem foi utilizado o modelo 121 – Hydrocyclone 2. Este modelo é baseado nas equações empíricas constituídas como resultado de um trabalho experimental por Plitt.⁽²⁾
- **Flotação** - Modelo Flotation (2B) – Para as etapas de flotação foram utilizados o modelo Esse modelo é baseado na representação da flotação por um fenômeno cinético de primeira ordem. No entanto, neste modelo, considera-se que existem duas sub-populações para cada tipo de partícula, que correspondem aos comportamentos frente à flotação: um tipo flotante e um tipo não-flotante. Esta é expressa por um máximo possível de recuperação $R_i \infty$ para cada tipo de partícula i . O modelo considera que a valorização máxima possível é independente da distribuição de tamanho. Se as sub-populações da flotação não são definidos, a recuperação máxima é de 100%. A constante cinética é calculada para cada tipo de partícula i e j classe de tamanho de acordo com a fórmula de King.

2.3.1 Regras sistema especialista

Seguem descrição das regras configuradas no sistema especialista para gerenciar o simulador externo.

O sistema especialista recebe as seguintes informações do PLC:

- massa de alimentação de Itabirito; da reclassificação de finos; dos finos de fabrica nova, do rejeito da separação no WDRE e da alimentação da deslamagem;
- densidade e vazões das alimentações dos ciclones;
- pressão dos ciclones;
- potência do moinho;
- granulometria do *overflow* da classificação da moagem pelo PSM;
- teores de Ferro e sílica da alimentação e concentrado final da flotação; e
- retido em 100 mesh da alimentação e concentrado final da flotação.

O sistema especialista após validar as informações obtidas no PLC, envia as informações de alimentação para o simulador externo, que após compilado retorna o balanço de massas para o sistema especialista, que o compara com as informações existentes. Caso esta comparação esteja dentro de um erro aceitável, as outras informações de interesse, como a granulometria do *overflow* da classificação é enviada para o controle de processo, caso o erro não seja aceitável o especialista altera os parâmetros internos de calibração dos modelos matemáticos do simulador externo até se atingir o erro aceitável. A Figura 6 mostra a árvore de regras geradas no sistema especialista.

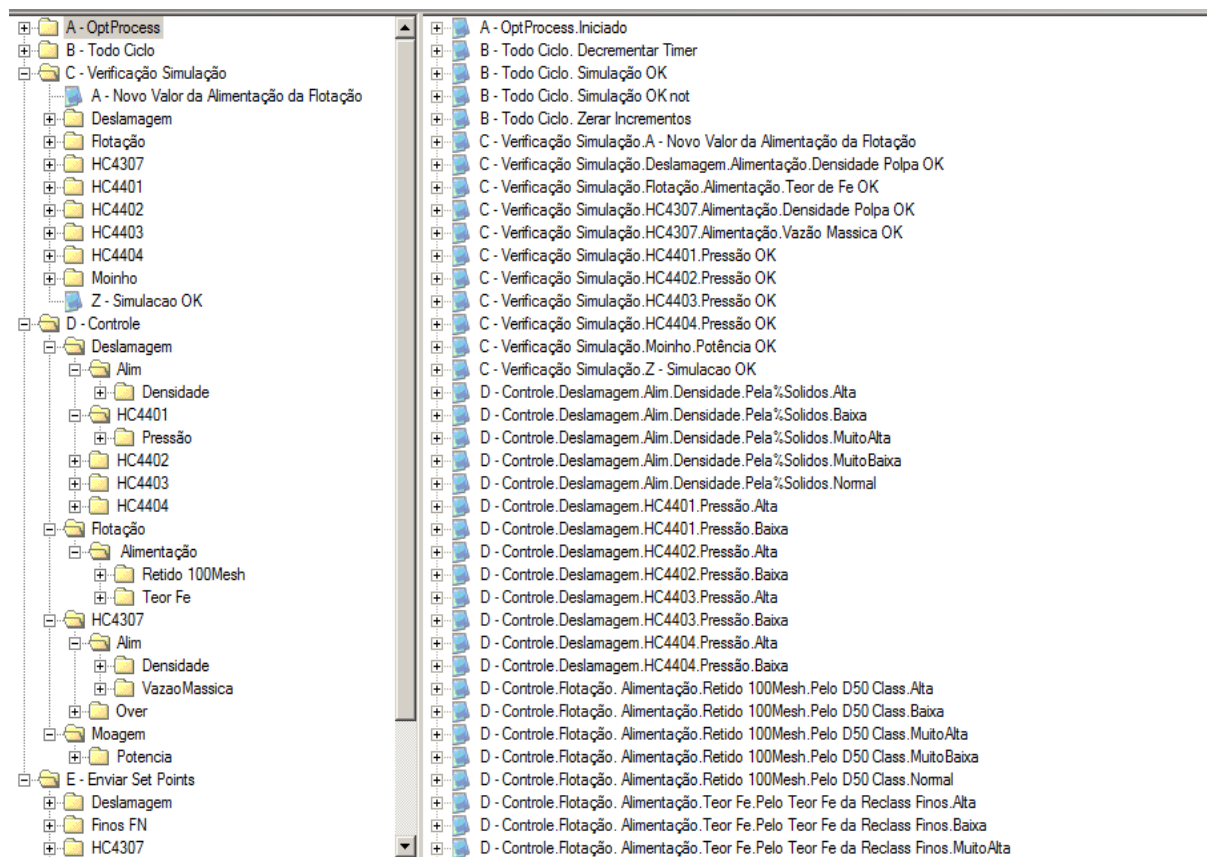


Figura 6. Árvore de regras do sistema especialista.

3 RESULTADO

O resultado do simulador dinâmico é o balanço de massas completo e detalhado dos circuitos simulados, obtendo informações importantes para o controle de processo. A Figura 7 mostra a variação do volume, massa, densidade e porcentagem de sólidos da alimentação dos hidrociclones da classificação da moagem (linhas claras) e compara

com o resultado da simulação dinâmica (linhas escuras). Pode-se observar que o simulador consegue rapidamente ajustar os valores reais com os simulados, obtendo um balanço detalhado e realista facilmente.

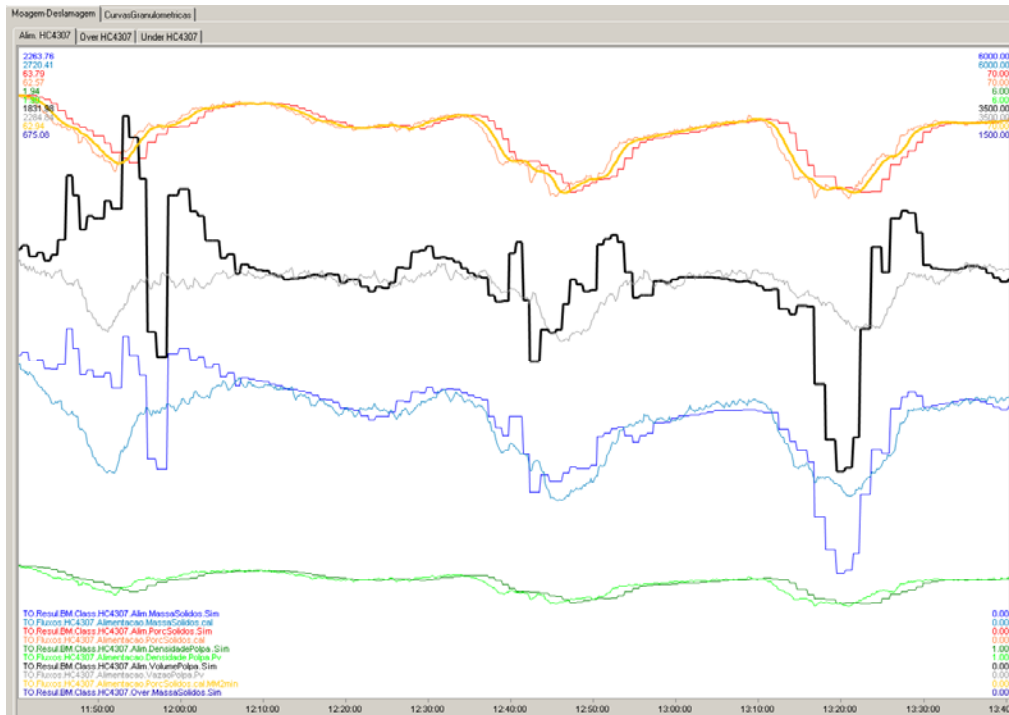


Figura 7. Gráfico comparativo da alimentação da classificação real com a simulada.

A Figura 8 apresenta o retido em 100 mesh do simulado e do medido pelo PSM, mostrando que os dois têm uma excelente correlação. Sendo assim, perfeitamente possível, a utilização da simulação dinâmica como um *Soft sensor* para estivar a granulometria do *overflow* da classificação para o controle de processo.

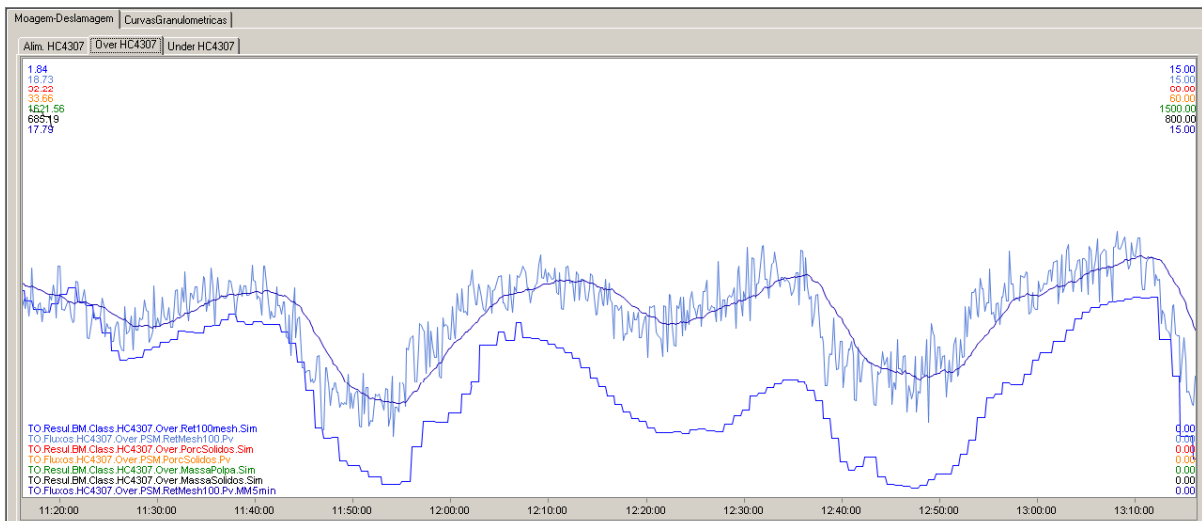


Figura 8. Gráfico comparativo do retido em 100 mesh medido pelo PSM com o simulado.

4 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Com este projeto podemos concluir que a utilização da simulação dinâmica representa um novo marco no campo do controle de processos minerais. A possibilidade de simular, utilizando inferências estatísticas, a variabilidade natural dos parâmetros de

uma planta, como sua alimentação, conduz a resultados, similares ou até mesmo mais confiáveis que os medidores existentes, sendo possível utilizar a simulação dinâmica para estimar valores importantes para o controle de processo.

REFERÊNCIAS

- 1 R.L. Wiegel, The Rational behind the Development of One Model Describing the Size Reduction/Liberation of Ores, in Advances in Comminution, Ed. By S. Komar Kawatra, SME, 2006, pp.225-241.
- 2 L.R. Plitt, "A mathematical model of the hydrocyclone classifier", CIM Bull., Dec. 1976.