

RAFAEL DOS SANTOS SENEFONTE

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE UMA
USINA DE BENEFICIAMENTO DE FOSFATO**

**São Paulo
2015**

RAFAEL DOS SANTOS SENEFONTE

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE UMA
USINA DE BENEFICIAMENTO DE FOSFATO**

Trabalho de Formatura em Engenharia
de Minas do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo
2015**

TF-2015
Se56 m

Lyens 2754/46

H2015c.

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009995

FICHA CATALOGRÁFICA

Senefonte, Rafael dos Santos

**Modelagem e simulação do circuito de moagem de
uma usina de minério de fosfato/ R. dos S. Senefonte
São Paulo, 2015.**

32 p.

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de
Minas e de Petróleo.**

**1. Cominuição 2. Simulação (Modelagem matemática)
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas II. t.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e mais importante, agradeço à minha mãe Magali, por sempre ter me apoiado independente de quaisquer escolhas que eu fiz para minha vida e por ter batalhado duramente pela minha formação. Eu te amo.

Às duas meninas mais bonitas e legais do mundo, que por acaso são minhas irmãs, Juliana e Ana Clara, pela companhia durante todo esse o tempo e por me encherem de orgulho todos os dias.

Ao meu pai Edson por sempre ter confiado em mim e pelo apoio durante essa trajetória.

Ao meu Professor e mestre Homero, pelas oportunidades concedidas à mim, que contribuíram muito para meu crescimento e aprendizado. Agradeço também a toda equipe da HDA/LSC, que além do companheirismo e ensinamentos, foram uns dos meus melhores amigos durante minha faculdade, Rafão, Jatobá, Rogério, Juninho, Rosendo, Wellington e Victor, obrigado por tudo.

A Professora Ana Carolina por ter me ajudado a conseguir oportunidades importantes durante meu curso, por todo apoio e aprendizado.

Por fim, ao Centro Moraes Rêgo, por ser o lugar mais aconchegante da USP, e por ter permitido conhecer amigos que estarão comigo mesmo depois de terminar meu curso, e que felizmente, foram muitos. Com certeza será o lugar que mais deixará saudade.

RESUMO

Os circuitos industriais que envolvem cominuição são comumente modelados e simulados pelo Modelo de Misturador Perfeito ("*Perfect Mixing Model*" - PMM). Embora seja uma abordagem recente, esta encontra-se consolidada como recurso confiável para estipular melhorias e avaliar desempenhos de circuitos industriais.

A aplicação deste método foi feita de maneira prática e objetiva, utilizando um caso real, onde foi realizada uma amostragem em um circuito de moagem de uma usina que processa minério de fosfato, e neste estudo, o uso destas ferramentas serviram para compreender suas etapas e métodos, bem como simular cenários que permitiram propor melhorias de desempenho.

Os exercícios incluíram determinação da granulometria e porcentagem de sólidos dos fluxos amostrados, balanço de massas, ajustes dos modelos individuais e integrados para os equipamentos envolvidos no circuito estudado e simulações de cenários a partir de índices de desempenho. Esses exercícios mostraram que os modelos empregados, tanto para moinhos de bolas e classificação, foram adequados para incluir um grande número de variáveis de operação.

ABSTRACT

Industrial circuits that involves comminution are commonly modeled and simulated by Perfect Mixing Model – PMM. Although a recent approach, it is consolidated as a reliable resource to stipulate improvements and evaluate performances of industrial circuits.

The application of this concept was made by a practical and objective way, using an real case where a survey carried out at a grinding circuit of a phosphate ore processing plant, and in this study, the use of these tools have served to understand its stages and methods and simulate scenarios that allowed to propose performance improvements.

The exercises included determination of particle size and solids percentage of the streams, mass balance, model fitting of individual and integrated equipments involved in the study and simulations of scenarios. These exercises showed that the models used for both classification and grinding operations were suitable to explore a large number of operating variables.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	MODELO DO BALANÇO POPULACIONAL	9
3.2	MODELO DO MISTURADOR PERFEITO (PMM)	10
3.3	CLASSIFICAÇÃO	12
3.3.1	MODELO DE NAGESWARARAO	12
3.4	AMOSTRAGEM.....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1	AMOSTRAGEM	15
4.2	PENEIRAMENTO	17
4.3	SIMULAÇÃO	18
5	RESULTADOS	18
5.1	BALANÇO DE MASSAS	18
5.2	AJUSTES DOS MODELOS – “ <i>MODEL FIT</i> ”	22
5.3	SIMULAÇÕES	25
5.3.1	CENÁRIO A.....	27
5.3.1	CENÁRIO B.....	27
5.3.2	CENÁRIO C.....	28
6	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
	APÊNDICE A.....	32
	APÊNDICE B.....	33
	APÊNDICE C.....	34
	APÊNDICE D.....	35

1 INTRODUÇÃO

Etapas de cominuição representam uma grande parcela do capital e custo operacional em uma usina de processamento mineral. Cohen (1983) estimou que processos de cominuição podem representar de 30% a 50% do consumo energético da usina, podendo chegar até 70% para minérios muito tenazes. Sendo assim, sua otimização está diretamente relacionada com a redução destes custos (operação).

Atualmente, a simulação por meio de recursos computacionais é uma prática consagrada no dimensionamento e otimização dos circuitos industriais de moagem. A simulação é capaz de avaliar o desempenho de circuitos de cominuição, além de determinar a interação entre as diversas unidades do circuito, permitindo mudanças na configuração do circuito proposto e mudanças operacionais. Além disso, a simulação fornece detalhes de operação do circuito, incluindo distribuições granulométricas, vazões de sólidos e de água.

O modelo de balanço populacional é o mais comumente utilizado (EPSTEIN, 1947) como base para modelos mecanísticos e fenomenológicos.

O presente trabalho tem como foco a etapa de moagem de uma usina que processa minério de fosfato. As etapas de desenvolvimento deste trabalho consistiram em uma amostragem realizada nos principais fluxos do circuito, tratamento destas amostras para obtenção de granulometria, porcentagem de sólidos e teores, e modelagem e simulações de cenários que pudessem melhorar o circuito existente.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo utilizar modelagem e simulação em uma etapa de moagem de uma usina de minério de fosfato, para estabelecer cenários que permitam melhorar o desempenho do circuito estudado, utilizando dados provenientes de uma amostragem realizada nos principais fluxos.

O estudo foi realizado com auxílio do simulador JKSimMet Versão 6.2 que se desenvolveu no *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*, da Universidade de Queensland.

Neste estudo, foi feita uma análise crítica sobre a qualidade dos dados obtidos na amostragem realizada, buscando garantir a eficácia do uso da ferramenta computacional, que é imprescindível para melhor compreensão das teorias de modelagem.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo propor mudanças operacionais baseadas em simulações, a partir de calibração de modelos matemáticos dos equipamentos utilizados no circuito (moinho de barras, moinho de bolas e ciclone).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentados os conceitos envolvidos no processo de moagem em moinho de bolas, incluindo as etapas de classificação. Também são apresentadas revisões da literatura referente a modelos matemáticos utilizados em circuitos de cominuição e técnicas de simulação empregando tais modelos.

3.1 MODELO DO BALANÇO POPULACIONAL

O *Population Balance Model (PBM)* foi introduzido por Epstein em 1947 e posteriormente desenvolvido por Austin e Kimpel (1964), Austin; Klimpel e Luckie (1984), Kelsall; Reid e Stewart (1969), Herbst e Fuerstenau (1968 e 1980) e Herbst; Lo e Rajamani (1985). O texto que se segue tem por base a apostila do curso de pós-graduação do prof. Homero Delboni Jr.

O *PBM* também é conhecido como “modelo de taxa de primeira ordem”, pois assume-se que o produto gerado no interior do moinho por intervalo de tempo depende apenas da massa da fração granulométrica presente no interior do moinho. Desta forma, cada fração apresenta uma constante própria que representa sua taxa de desaparecimento k_i , utilizada para calcular sua taxa de quebra, ou *breakage rate*, como demonstrado na equação 1 a seguir.

$$\text{Massa Moída} = k_i s_i \quad (1)$$

Onde:

k_i = taxa de quebra (h^{-1});

s_i = massa da i -ésima fração granulométrica no interior do moinho.

A hipótese de quebra de primeira ordem traz uma simplicidade ao modelo que facilita sua utilização. No entanto, o mesmo torna-se limitado na aplicação a faixas de operação muito amplas. Por isso, assume-se que o número de impactos em cada intervalo de energia é aproximadamente constante. Logo, se o número de partículas for muito superior ou inferior ao número de impactos, a premissa de primeira ordem não será válida.

A taxa de quebra k_i , pode ser estimada a partir de ensaios de laboratório, ou ser retrocalculada. A dedução desta equação tem por base o balanço de massas para uma faixa granulométrica individual, como demonstrado a seguir:

Alimentação + Material fragmentado de faixas superiores
--

Produto + Material fragmentado que sai da faixa
--

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i \quad (2)$$

Onde:

- f_i = vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente à i -ésima fração granulométrica (t/h);
 p_i = vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente à i -ésima fração granulométrica (t/h);
 b_{ij} = função distribuição de quebra, correspondente a fração da j -ésima faixa granulométrica, que aparece na i -ésima faixa granulométrica devido à fragmentação;
 k_j = função taxa de quebra correspondente à j -ésima fração granulométrica (h^{-1});
 s_j = massa da carga no interior do moinho, correspondente à j -ésima fração granulométrica (t).

Através de amostragens os parâmetros p_i , f_i , e s_i podem ser determinados juntamente com uma função que seja representativa para o parâmetro b_{ij} , é possível calcular diretamente um conjunto de valores k_i , começando a partir da faixa granulométrica superior.

Uma derivação do PBM, foi desenvolvida na Austrália por Willian Whiten. O modelo foi chamado de *Perfect Mixing Model* – PMM ou Modelo de Misturador Perfeito, sendo o principal modelo utilizado em modelagem de circuitos industriais, descrito no próximo item.

3.2 MODELO DO MISTURADOR PERFEITO (PMM)

O Modelo do Misturador Perfeito ou *Perfect Mixing Model* (PMM) proposto por Whiten (1976) pode ser considerado um caso particular do PBM, e atualmente é o principal modelo empregado em modelagem de circuitos industriais de moagem.

O PMM baseia-se no equilíbrio de cada faixa granulométrica que compõe a carga do moinho, que está perfeitamente misturado. A carga do moinho está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga para cada faixa granulométrica. Deste modo, as equações básicas do PMM são definidas pelas equações 3 e 4 apresentadas a seguir.

$$p_i = d_i s_i \quad (3)$$

O balanço de massas para cada faixa granulométrica é então dado pela equação 4 abaixo.

$$f_i + \sum_{j=1}^i r_j s_j a_{ij} = p_i + r_i s_i \quad (4)$$

Subtraindo-se a condição de j igual a i na somatória da massa proveniente da fragmentação de frações mais grossas que a considerada, chega-se à forma mais comum da equação básica do PMM (DELBONI JR., 2012), conforme ilustrada na equação 5 abaixo.

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^{i-1} r_j s_j a_{ij} - r_i s_i (1 - a_{ii}) = 0 \quad (5)$$

Os vetores f_i , p_i e s_i representam, respectivamente, a taxa de alimentação do moinho, a taxa de descarga do moinho e o conteúdo interno do moinho (carga) em cada intervalo granulométrico. A variável a_{ij} representa a fração retida na malha i proveniente da malha j , após um evento de fragmentação, e o parâmetro r_i corresponde à frequência desses eventos para a i -ésima faixa granulométrica.

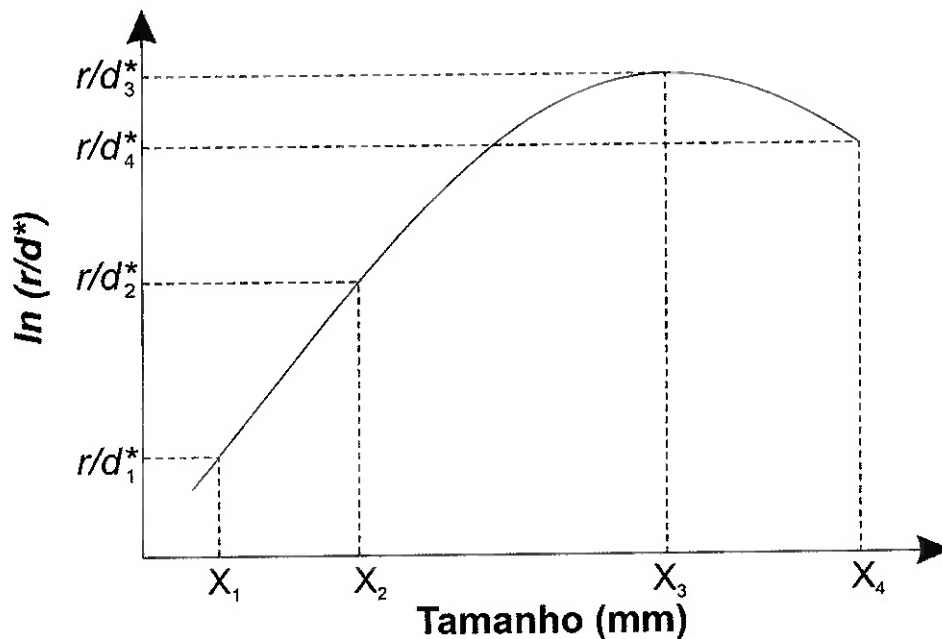
Segundo Napier-Munn *et al.* (1996) uma limitação de ordem prática importante, sob o ponto de vista da modelagem matemática, é a impossibilidade de se quantificar diretamente a distribuição granulométrica do minério contido na câmara interna dos moinhos.

Para tanto, as duas equações básicas do *PMM* (Equações 34 e 36), foram modificadas de forma a possibilitar a sua aplicação em modelagem de moinhos, permitindo a normalização dos parâmetros taxa de quebra e descarga. Logo combinando as duas equações do *PMM* chega-se à equação 6 apresentada a seguir.

$$f_i - p_i \left(1 + \frac{r_i}{d_i} (1 - a_{ii}) \right) + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \left(\frac{r_i}{d_i} \right) p_i = 0 \quad (6)$$

Portanto, o quociente r/d torna-se o principal parâmetro do modelo, e pode ser determinado através da distribuição granulométrica da alimentação e do produto do moinho, além de uma função quebra que represente com fidelidade o minério processado (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). A divisão do quociente r/d pelo tempo de residência médio das partículas no interior do moinho leva à normalização do mesmo, independente das dimensões e condições operacionais do moinho estudado. O parâmetro r/d^* normalizado é representado pela curva quadrática da Figura 1, e é definida por 3 ou no máximo 4 pontos. Para que se possa cobrir toda a faixa granulométrica estudada utiliza-se o método spline function.

Figura 1. Distribuição do Parâmetro r/d^*



(Fonte: adaptado de Napier-Munn *et al.*, 1996).

3.3 CLASSIFICAÇÃO

A classificação após circuitos de moagem em moinho de bolas pode ser realizada por dois tipos de equipamentos, classificadores espirais e ciclones. Entretanto, devido às vantagens dos ciclones em relação aos classificadores espirais estes tem perdido cada vez mais espaço na indústria mineral, como capacidade elevada em relação a área ocupada, baixo custo relativo de aquisição, controle operacional simples e alta disponibilidade.

3.3.1 MODELO DE NAGESWARARAO

O modelo de Nageswararao (1978 e 1995) foi desenvolvido diretamente a partir do modelo de Lynch e Rao (1975). Assim como os modelos apresentados anteriormente, este foi elaborado com base em dados experimentais obtidos a partir de testes em escala piloto. Nageswararao estimou expoentes empíricos para quatro equações referentes ao cálculo dos parâmetros, que descrevem o processo de classificação em hidrociclones, quais sejam, diâmetro mediano de partição, partição de água e de polpa ao *underflow* e vazão volumétrica da alimentação.

As equações (16, 17, 18 e 19 apresentadas a seguir, representam o cálculo dos parâmetros diâmetro mediano de partição (d_{50c}), partição de água (R_f), partição de polpa (R_v) e vazão volumétrica de alimentação (Q), respectivamente.

$$d_{50c} = K_{D0} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} \theta^{0,15} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} D_c^{0,35} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,52} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{-0,47} \lambda^{0,93} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,22} \quad (16)$$

(61)

$$R_f = K_{W1} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} \theta^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1,19} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2,40} \lambda^{0,47} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,53} \quad (17)$$

$$R_v = K_{V1} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,25} \theta^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-0,94} \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{1,83} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c}\right)^{-0,31} \quad (18)$$

$$Q_f = K_{Q0} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0,45} \theta^{-0,1} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,2} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0,68} D_c^2 \left(\frac{P}{\rho_p}\right)^{0,5} \quad (19)$$

Onde:

- D_c = diâmetro do hidrociclone (m);
- D_o = diâmetro do *vortex* (m);
- D_u = diâmetro do *apex* (m);
- D_i = diâmetro do *inlet* (m);
- L_c = comprimento da seção cilíndrica (m);
- θ = ângulo da seção cônica (graus);

- P = pressão na entrada do ciclone (kPa);
 ρ_p = densidade da polpa de alimentação (t/m³);
 g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
 Q_f = vazão volumétrica de polpa (m³/h);
 R_f = recuperação de água para o *underflow* (%);
 R_v = recuperação de polpa para o *underflow* (%);
 K 's = constantes empíricas;
 C_v = concentração volumétrica de sólidos da alimentação (decimal);
 λ = termo de correção referente à livre até a impedida velocidade terminal de sedimentação (STEINOUR, 1944), determinada pela concentração volumétrica de sólidos na alimentação:

$$\lambda = \frac{10^{1,82C_v}}{8,05(1 - C_v)^2} \quad (19)$$

As constantes de proporcionalidade K 's permitem a calibração das respectivas equações, as quais dependem exclusivamente do minério alimentado aos hidrociclones. Desta forma, o processo de classificação em hidrociclones pode ser modelado e simulado para diferentes condições operacionais.

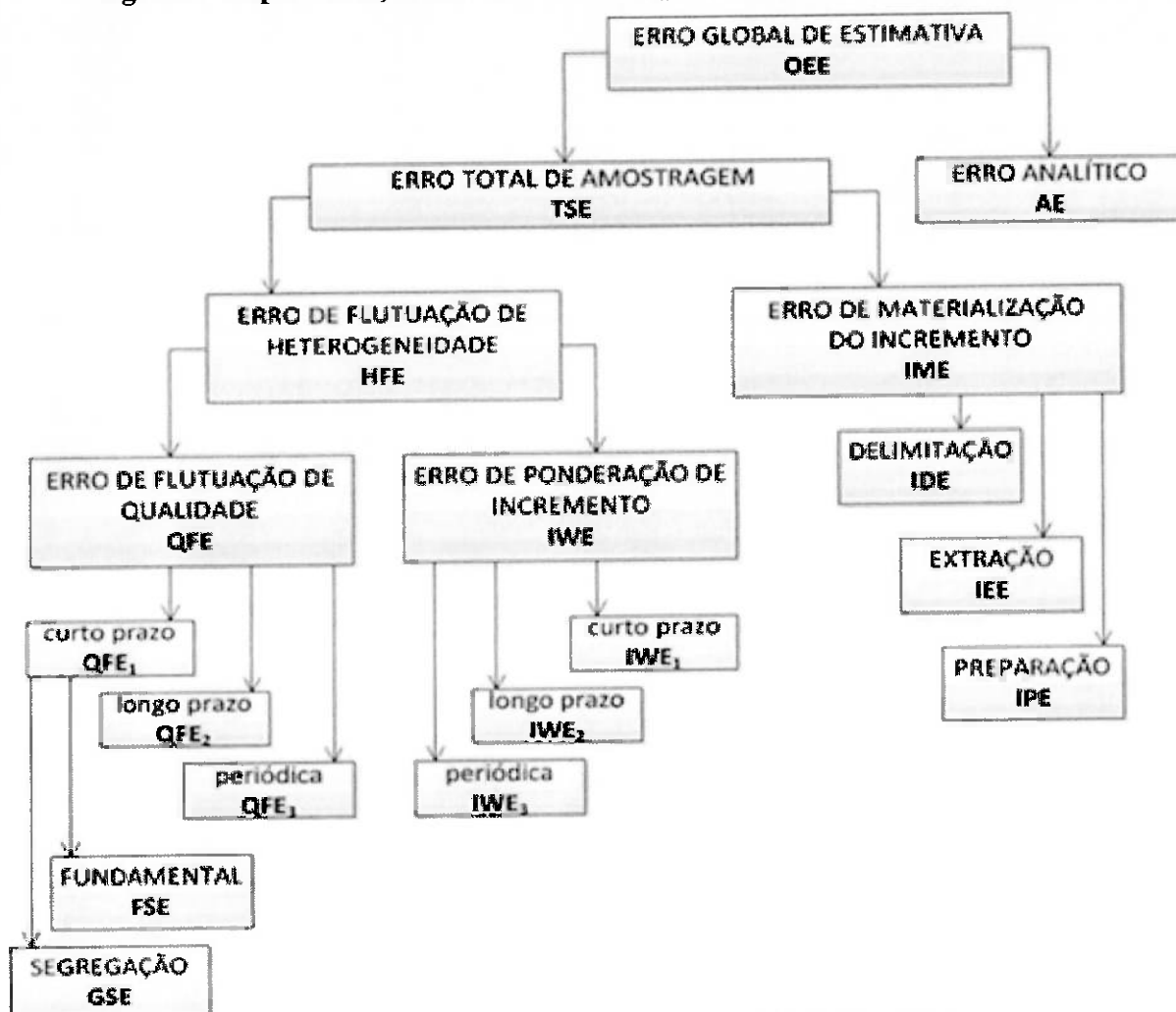
3.4 AMOSTRAGEM

O processo de amostragem pode ser definido como um conjunto de operações que visam recolher, de um universo, uma parcela significativa que o represente da melhor maneira possível. Segundo Gy (1998), "o único objetivo da amostragem é reduzir a massa de um lote L sem inserir mudanças significativas em suas outras propriedades".

Para que um circuito de moagem seja totalmente representado, todos os fluxos que o compõem devem ser amostrados. Todas as partículas que compõem o fluxo devem ter a mesma probabilidade de ser coletadas e fazer parte da amostra composta.

A tomada das amostras e posteriores quarteamentos e manuseios devem ser realizados de forma a eliminar ou minimizar os possíveis erros de amostragem. A Figura 16 ilustra todos os componentes do erro global de estimativa (PITARD, 2010 *apud* CHAVES, 2011).

Figura 2. Representação de Todos os Componentes do Erro Global de Estimativa.



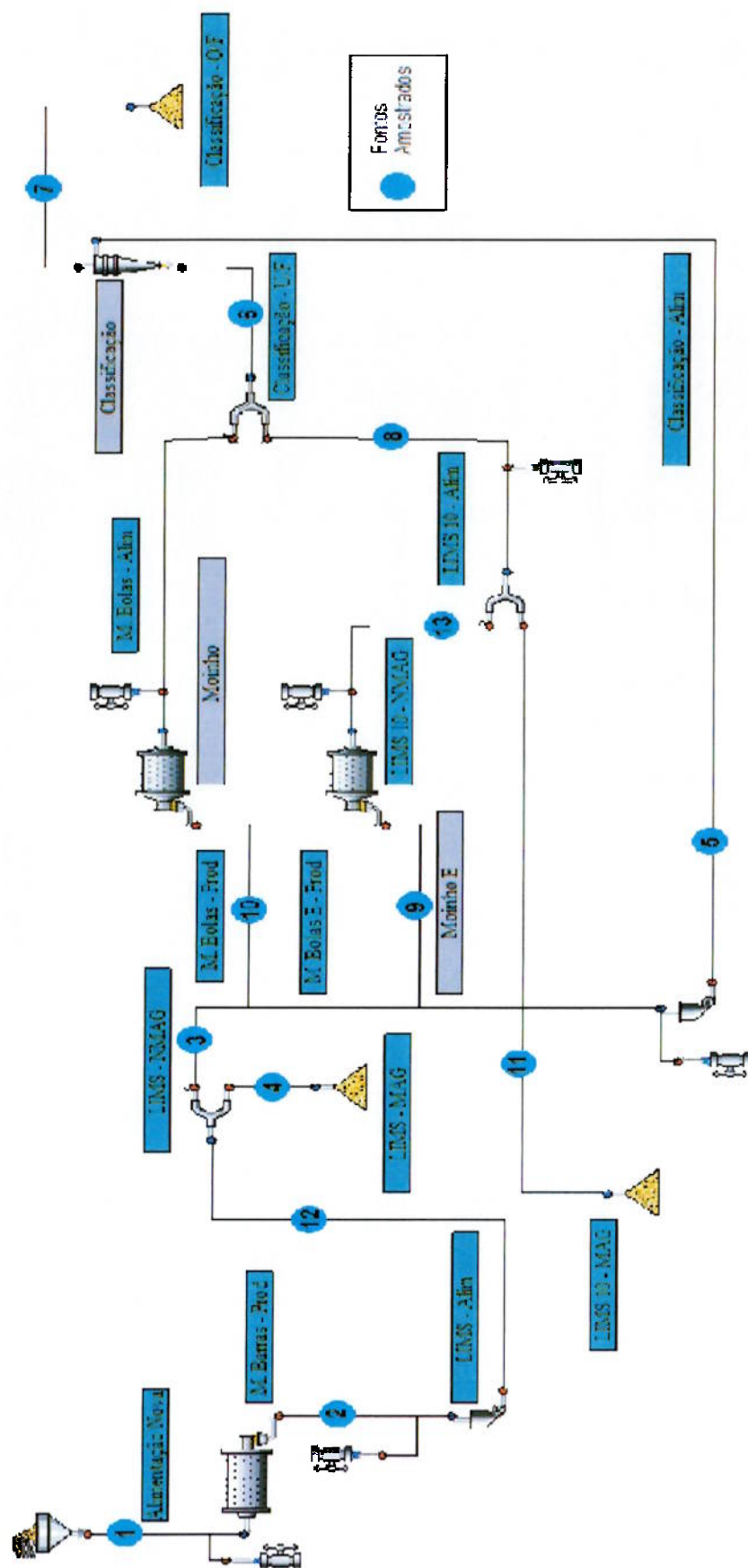
(Fonte: PITARD, 2010 *apud* CHAVES, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AMOSTRAGEM

A amostragem no circuito de moagem da usina de minério de fosfato foi realizada em 2 de junho de 2015. A Figura 3 mostra o fluxograma conceitual, bem como os treze pontos amostrados no circuito de moagem.

Figura 3. Circuito de moagem amostrado.



Fonte: arquivo pessoal.

Os pontos amostrados foram os seguintes:

1. Alimentação nova;
2. Produto do moinho de barras;
3. Concentrado não magnético LIMS (*Low Intensity Magnetic Separation*);
4. Rejeito magnético LIMS (*Low Intensity Magnetic Separation*);
5. Alimentação da classificação;
6. *Underflow* da classificação;
7. *Overflow* da classificação;
8. Alimentação da separação magnética LIMS 10;
9. Produto do moinho de bolas E;
10. Produto do moinho de bolas;
11. Rejeito magnético LIMS 10.
12. Alimentação da separação magnética LIMS;
13. Alimentação do moinho E.

A amostragem de fluxos de polpas é preferencialmente realizada de maneira incremental. Além disso, deve-se tomar o cuidado especial em evitar que a polpa transborde do amostrador. Nota-se que alguns pontos amostrados são redundantes, contudo recomenda-se que estes também sejam tomados para garantir uma base de dados confiável e robusta para as etapas subsequentes de análise de desempenho.

4.2 PENEIRAMENTO

O peneiramento à úmido em bancada foi realizado para cada amostra tomada na amostragem, para determinação da distribuição granulométrica dos fluxos. Cada peneiramento em determinada malha é conduzido de modo que em cada bacia, a peneira fique com a tela submersa e, através de movimentos circulares e ascendentes repetidos, o material passe sucessivamente pela tela da peneira em cada uma das três bacias, até que a fração retida fique praticamente isenta de partículas finas. Um indicador de eficiência elevada do processo é manter a água da terceira bacia praticamente isenta de sólidos, como mostrado na Figura 3 na sequência.

As malhas utilizadas foram: 6,35 mm, 3,35 mm, 1,68mm, 0,850 mm, 0,425 mm, 0,212 mm, 0,150 mm, 0,106 mm, 0,074 mm, 0,053 mm e 0,038 mm.

Figura 4. Peneiramento a úmido.



(Fonte: arquivo pessoal.)

4.3 SIMULAÇÃO

A partir dos resultados, foi determinada a consistência dos dados obtidos e foram realizados ajustes quando necessários através do balanço de massas dos circuitos amostrados. O balanço de massas consiste em calcular valores com desvios aceitáveis em relação aos dados experimentais, de forma que sejam consistentes e respeitem a conservação de massa do circuito.

Os resultados desta etapa foram a base para a modelagem matemática dos circuitos de moagem amostrados e definição dos parâmetros para simulação dos mesmos.

O *software* utilizado para fechamento de balanço mássico, modelagem e simulação foi o JKSimMet Versão 6.2, cujos modelos empregados foram descritos na Seção 3.

5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos no balanço de massas, ajustes de modelos matemáticos e simulações, para o circuito de moagem estudado.

Abreviações de parâmetros calculados foram utilizadas de modo a reduzir o conteúdo textual das tabelas e figuras portadoras de resultados, conforme a seguinte legenda:

- PA – Porcentagem passante acumulada;
- P_{80} – Abertura da malha cujo 80% da amostra é passante;
- TPH – Toneladas por hora.
- Alim – Alimentação;

5.1 BALANÇO DE MASSAS

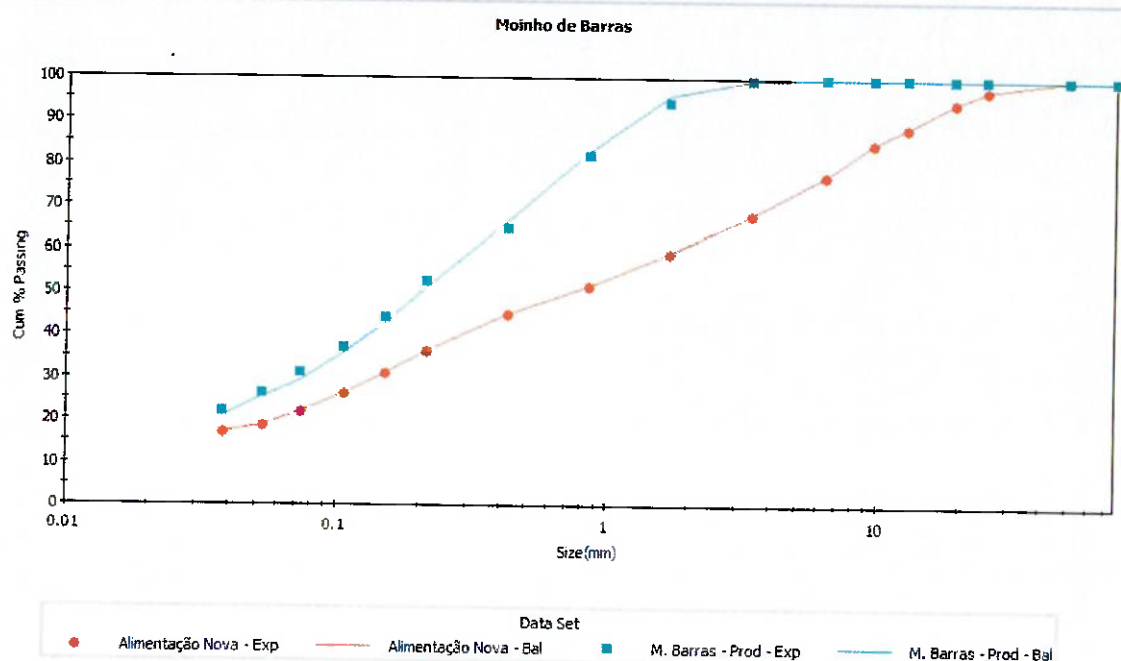
A primeira etapa deste trabalho, após obter os dados experimentais de granulometria e porcentagem de sólidos, foi necessário verificar a consistência dos dados amostrados através

do balanço de massas dos diversos fluxos da operação, pois os valores experimentais contêm erros.

O programa utilizado busca a minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores medidos e os valores calculados. Por este motivo, uma boa ponderação dos erros dos valores experimentais depende da experiência do usuário no fechamento do balanço, e atribuir desvios menores aos dados onde a amostragem foi realizada com maior qualidade.

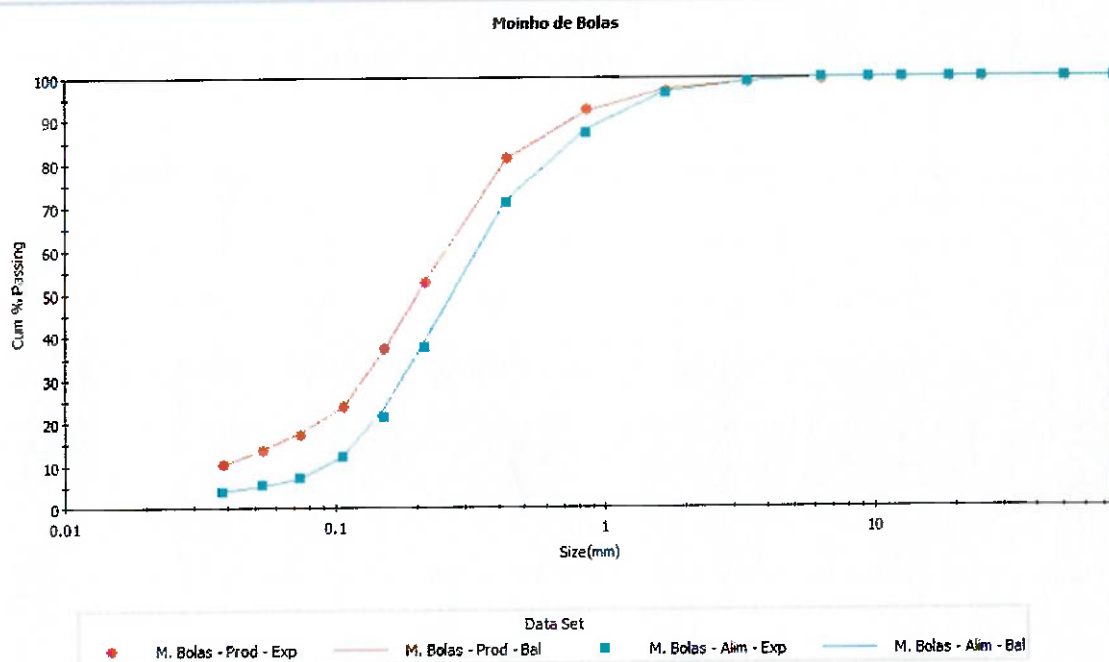
As curvas granulométricas das Figuras 5, 6 e 7 referentes às etapas de moagem de barras, moagem de bolas e classificação respectivamente, mostram a aderência entre os dados experimentais e os balanceados.

Figura 5. Granulometria – Moagem de barras.



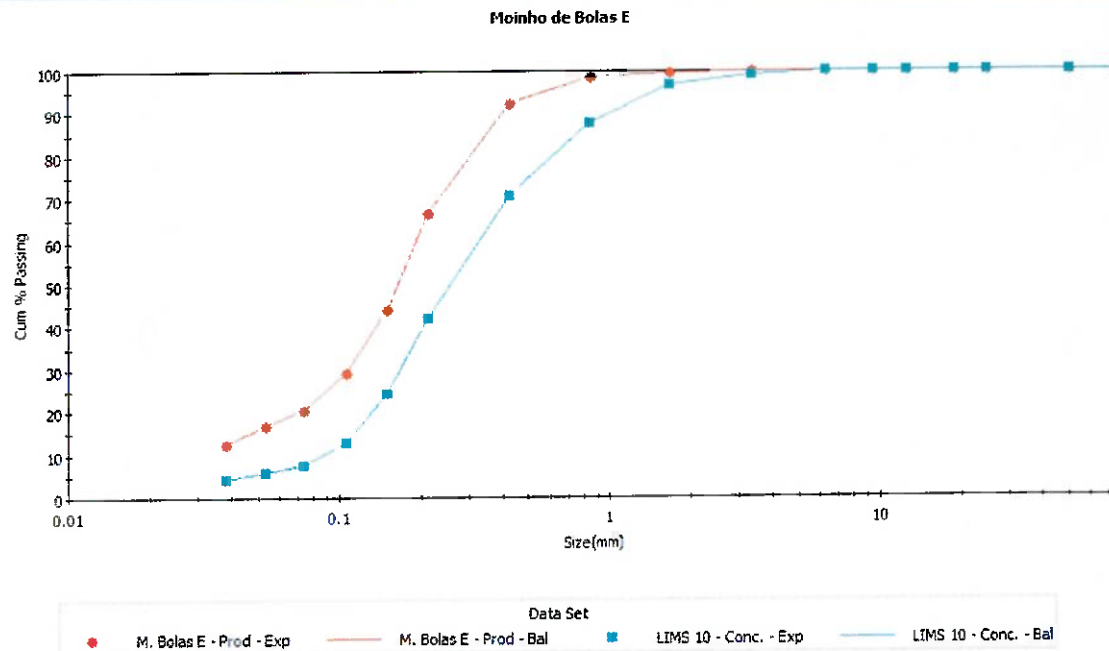
(Fonte: arquivo pessoal.)

Figura 6. Granulometria – Moagem de bolas.

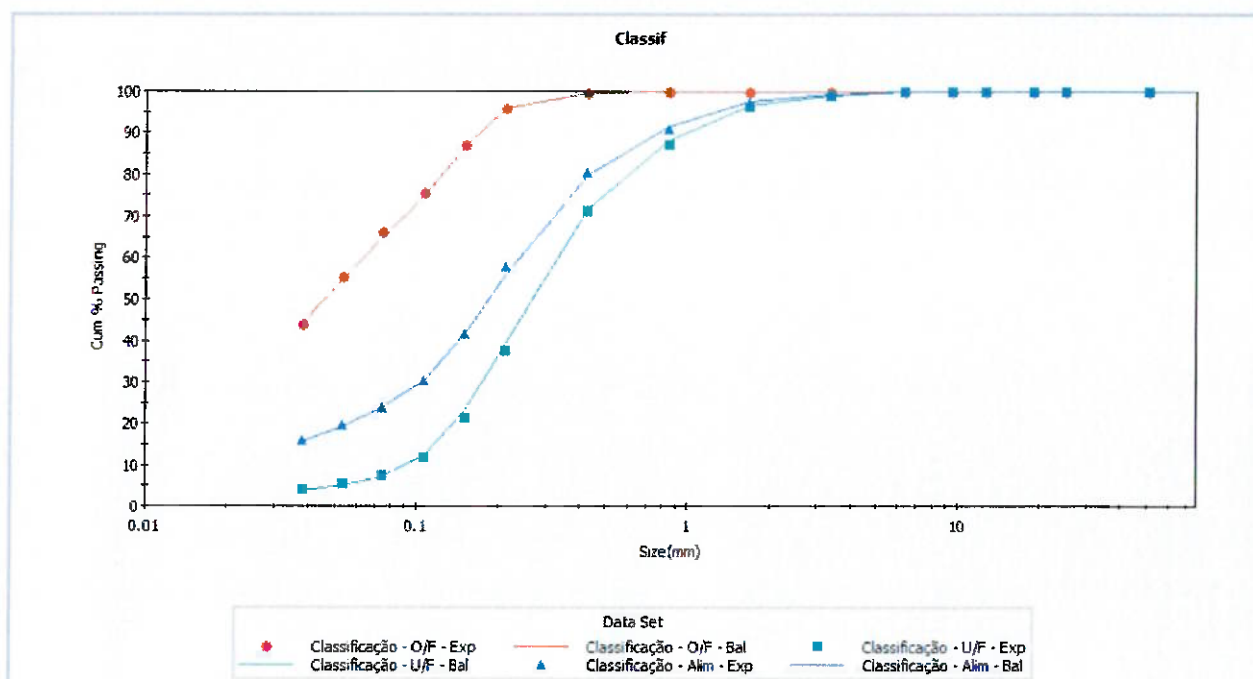


(Fonte: arquivo pessoal.)

Figura 6. Granulometria – Moagem de bolas E.



(Fonte: arquivo pessoal.)

Figura 7. Granulometria – Classificação.

(Fonte: arquivo pessoal.)

Das Figuras 5, 6 e 7, nota-se que houve aderência considerada adequada das curvas calculados pelo simulador aos dados experimentais, o que confirma a boa qualidade da amostragem.

O fluxograma que mostra os valores balanceados de TPH, porcentagem de sólidos e P_{80} experimentais e balanceados para todos os fluxos do circuito estudado, está apresentado no ANEXO D.

No ANEXO C estão apresentados em detalhes os resultados obtidos no balanço de massas realizado.

5.2 AJUSTES DOS MODELOS – “MODEL FIT”

A etapa de ajuste dos modelos empregados é um procedimento que antecede a simulação e é de suma importância, pois influencia diretamente na qualidade das respostas que serão obtidas em futuras simulações. Os modelos encontram-se devidamente calibrados quando as constantes presentes nas expressões matemáticas forem determinadas, de forma que as diferenças entre os valores de vazão e granulometria experimentais e calculados (ajustados) sejam mínimos.

As dimensões dos equipamentos e condições operacionais do circuito estudado (moinho de barras, moinhos de bolas e ciclone) estão descritas nas Tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1. Características dos moinhos.

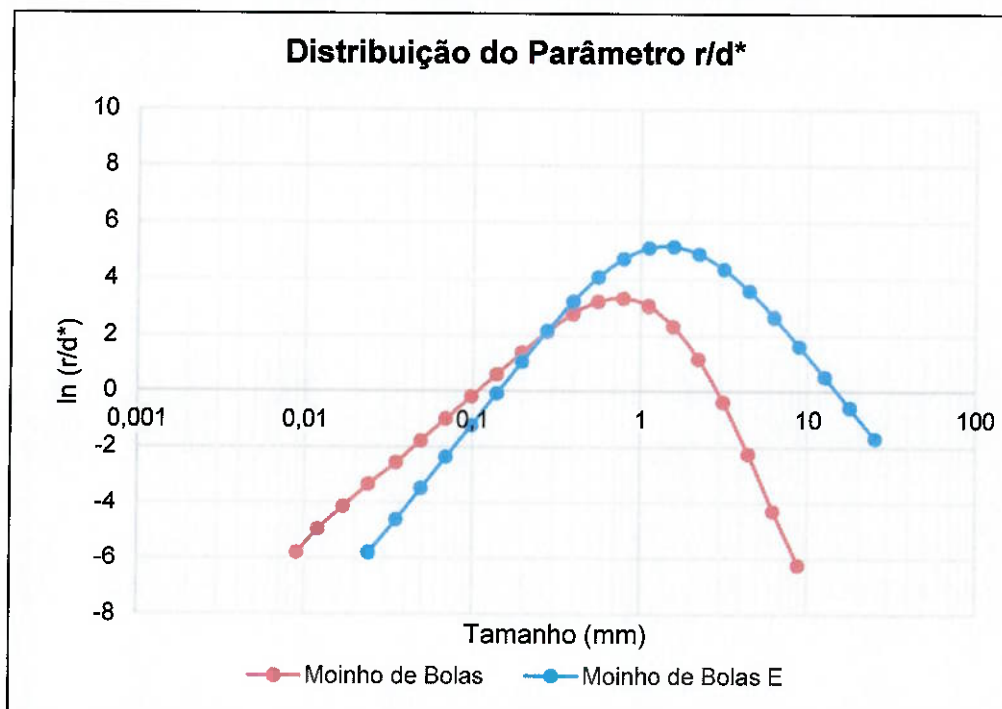
Parâmetro	Moinho de Barras	Moinho de Bolas	Moinho de Bolas E
Diâmetro interno (m)	3,3	4,2	1,7
Comprimento interno (m)	4,8	4,5	4,7
% da velocidade crítica (%)	74	70	71
Grau de enchimento (%)	35	35	35

Tabela 2. Características do ciclone.

Parâmetro	Ciclone
Diâmetro do ciclone (pol.)	26
Diâmetro da entrada (m)	0,211
Diâmetro do vortex (m)	0,255
Diâmetro do apex (m)	0,125
Comprimento (m)	0,775
Ângulo do cone	20°

A calibração do modelo empregado na moagem de bolas consiste no cálculo do parâmetro r/d^* , e para esta etapa foram empregados três nós desta função, de modo que fosse caracterizada a inversão da curva de distribuição deste parâmetro. A Figura 8, a seguir, mostra as curvas de distribuição do parâmetro r/d^* referentes aos dois moinhos de bolas utilizados no circuito

Figura 8. Distribuição do parâmetro r/d^* .



(Fonte: arquivo pessoal.)

Para o ajuste da etapa de classificação, foi utilizado o modelo de Nageswararao descrito na Seção 3. A Tabela 3, mostra os parâmetros da etapa de classificação ajustados pelo modelo empregado.

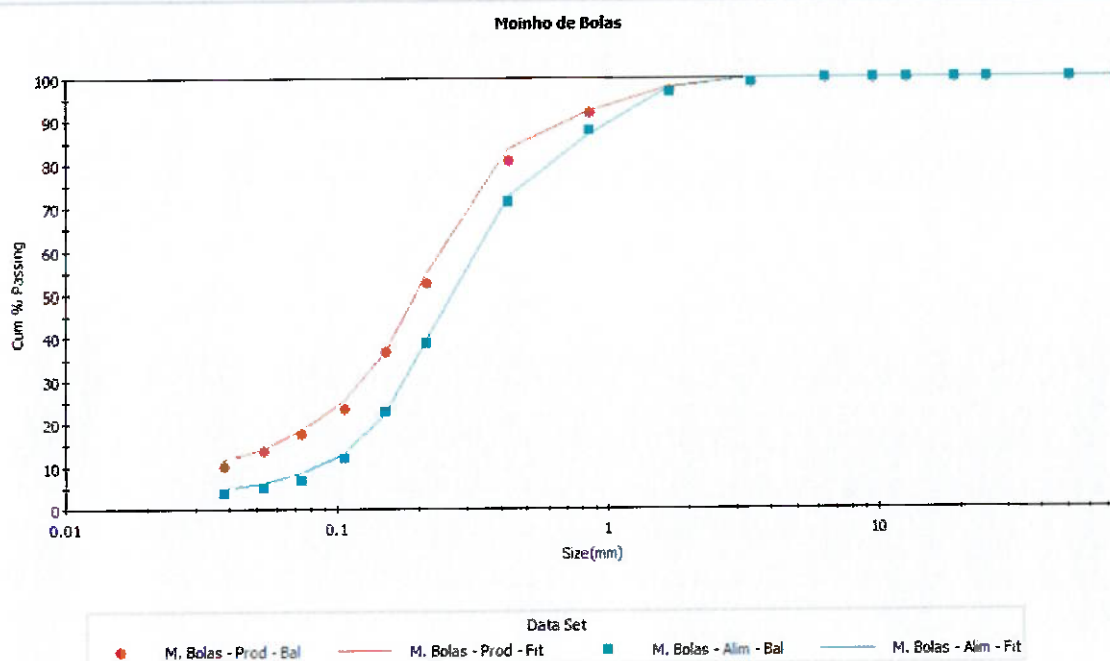
Tabela 3. Parâmetros do ciclone.

Parâmetro	Valor
Constante D50 - KD0	9,26E-05
Constante Capacidade - KQ0	558
Constante Volume Split - KV1	6,49
Constante Water Split - KW1	10,37
Alfa	1,94

Após a calibração dos modelos individuais, foi feita a integração de todas as operações do circuito estudado, de forma a estarem bem ajustados aos dados balanceados, e portanto, representar de forma correta a operação integral a ser simulada.

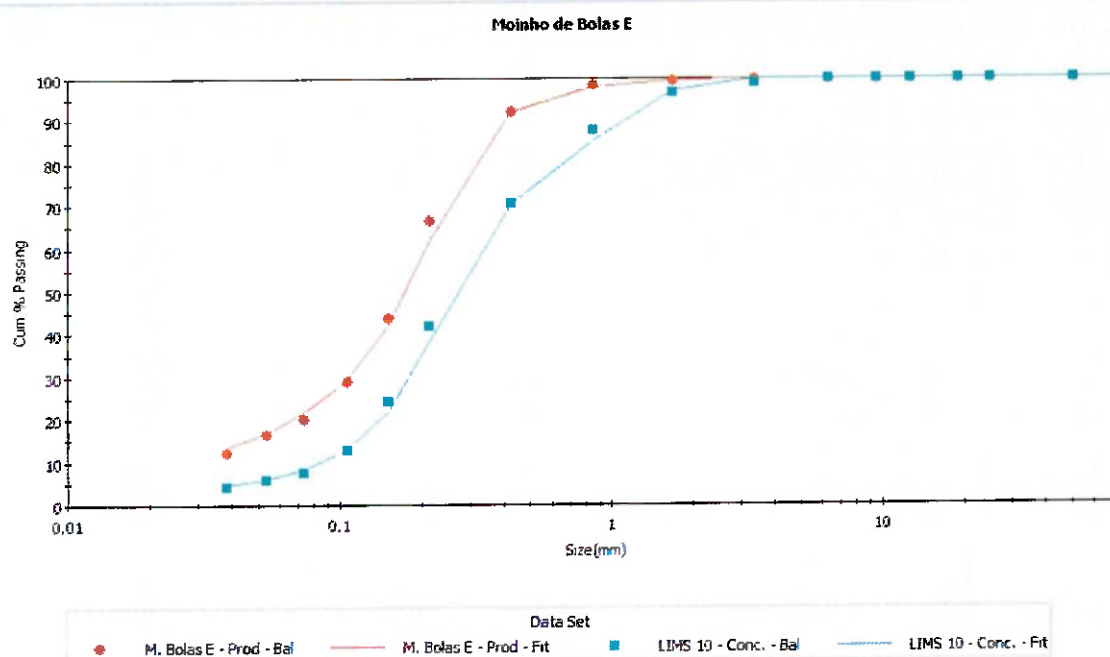
A Figura 10, mostra as curvas referentes aos dados balanceados e ajustados por modelos da etapa de moagem de bolas.

Figura 9. Dados balanceados e ajustados - Moagem.



(Fonte: arquivo pessoal.)

Figura 10. Dados balanceados e ajustados – Moagem E.

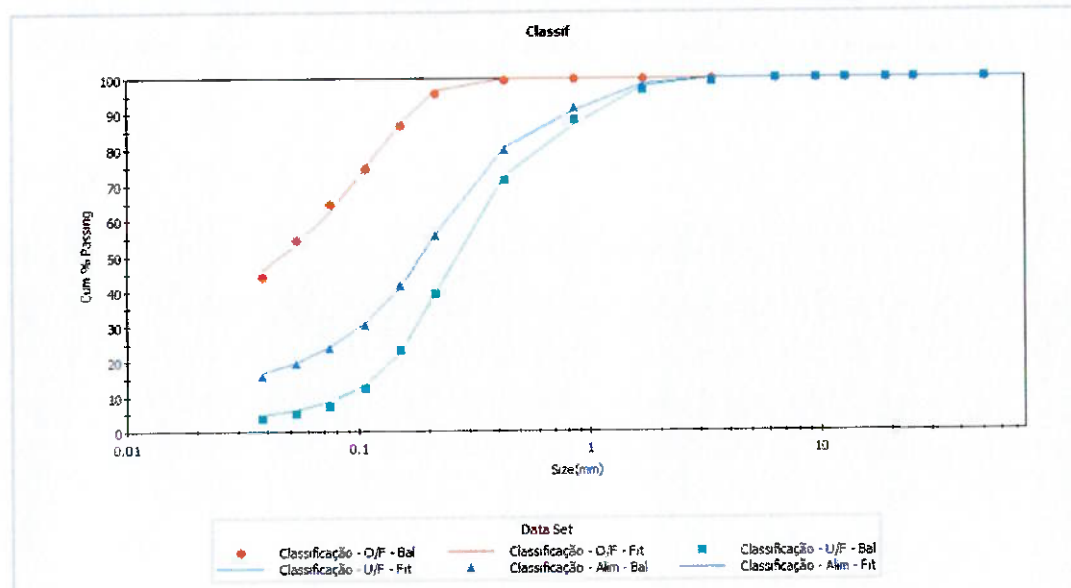


(Fonte: arquivo pessoal.)

Da Figura 10 é possível notar que para a etapa de moagem, o modelo foi bem calibrado para os dados balanceados.

A Figura 11 mostra as curvas referentes aos dados balanceados e ajustados para a etapa de classificação.

Figura 11. Dados balanceados e ajustados - Classificação.



(Fonte: arquivo pessoal.)

Da Figura 11 nota-se que houve boa aderência entre os dados balanceados e ajustados pelo modelo utilizado, para a etapa de classificação.

O fluxograma do circuito que constituiu o Caso Base, é apresentado no ANEXO D.

A qualidade adequada dos ajustes dos modelos empregados, indica que os modelos representam com fidelidade a operação estudada, sendo portanto, uma plataforma útil para as etapas de simulação.

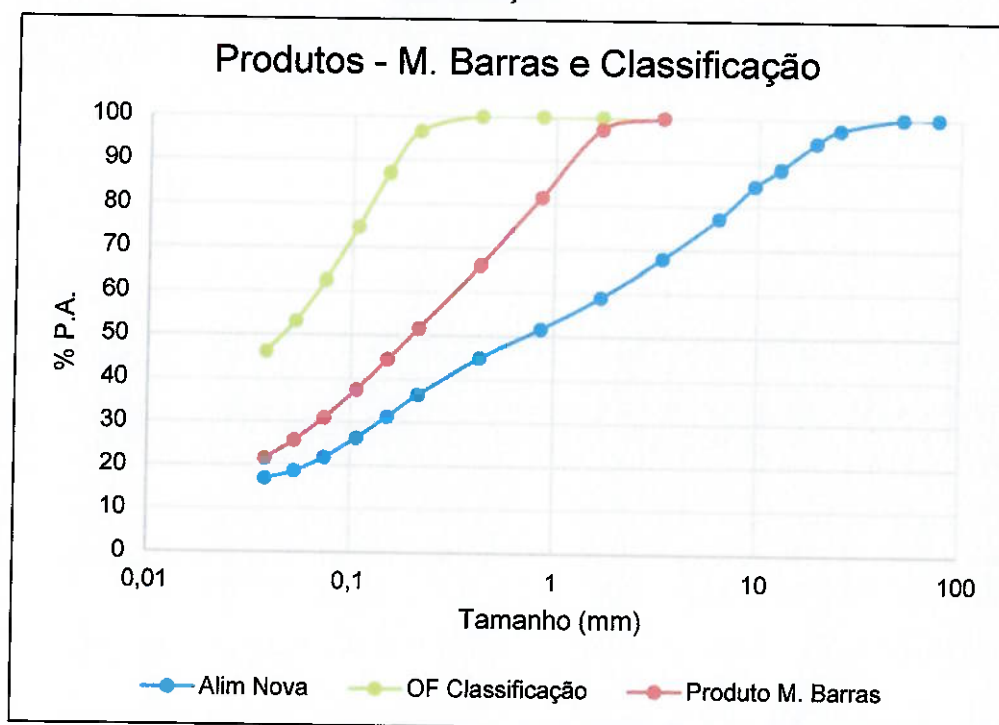
5.3 SIMULAÇÕES

O objetivo da simulação neste trabalho, foi melhor o desempenho do circuito de moagem estudado, focando principalmente em mudanças operacionais nas etapas de moagem e classificação. Para tal, foi necessária uma investigação de forma a determinar aspectos relevantes que pudessem ser melhorados.

Em uma primeira abordagem foi constatada grande geração de finos neste circuito de moagem, que são deletérios para a etapa de flotação subsequente.

A Figura 13, compara as curvas granulométricas da alimentação nova, produto do moinho de barras e do *overflow* do ciclone.

Figura 12. Curva granulométrica – Produtos da moagem de barras e classificação.



(Fonte: arquivo pessoal.)

A Tabela 4 mostra os valores que geraram as curvas granulométricas apresentadas na Figura 12.

Tabela 4. Granulometria - Produtos da moagem de barras e classificação.

Tamanho (mm)	% P.A.		
	Alimentação Nova	M. Barras - Prod	Classificação - O/F
76,2	100	100	100
50,8	100	100	100
25	97,4	100	100
19,05	94,5	100	100
12,7	88,5	100	100
9,5	84,7	100	100
6,35	77,3	100	100
3,35	68,0	100	100
1,68	59,1	97,3	100
0,85	51,8	81,8	100
0,425	44,9	66,1	100
0,212	36,4	51,6	96,5
0,15	31,3	44,5	87,0
0,106	26,4	37,6	74,6
0,074	21,9	31,0	62,6
0,053	18,7	25,8	53,2
0,038	16,9	21,6	46,1

Da Figura 12 e da Tabela 4, nota-se que houve aumento de 111% de finos do produto do moinho de barras para o produto final. Desta forma, as simulações foram conduzidas objetivando a diminuição dos finos (material passante em 0,038 mm) gerados nas etapas de moagem.

5.3.1 CENÁRIO A

Para este cenário foi alterado o diâmetro das bolas utilizadas no moinho de 40 mm (Caso Base) para 60 mm. A comparação entre os resultados obtidos pela simulação e o caso base podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5. Cenário A – Granulometria do OF da classificação.

Tamanho (mm)	% P.A. - OF Classificação	
	Simulado	Caso Base
0,425	100	100
0,212	96,0	96,5
0,15	85,4	87,0
0,106	72,9	74,6
0,074	61,0	62,6
0,053	51,8	53,2
0,038	45,0	46,1

Da Tabela 5 observa-se que houve redução de 1,1 pontos percentuais na geração de finos do circuito, com o aumento no diâmetro das bolas do moinho de 40 para 60 mm.

O fluxograma do circuito do Cenário A com valores de TPH, porcentagem de sólidos e P_{80} dos valores do Caso Base e simulados, são apresentados no ANEXO D.

5.3.1 CENÁRIO B

Para este cenário, foi alterada a porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone, de 48,2% para 46,4%. A comparação entre os resultados obtidos pela simulação e o Caso Base são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Cenário B – Granulometria do OF da classificação.

Tamanho (mm)	% P.A. - OF Classificação	
	Simulado	Caso Base
0,425	100	100
0,212	96,3	96,5
0,15	86,4	87,0
0,106	74,0	74,6
0,074	62,0	62,6
0,053	52,7	53,2
0,038	45,7	46,1

Da Tabela 6, observa-se que houve redução de 0,4 pontos percentuais na geração de finos do circuito, com a diluição da água na alimentação da classificação.

O fluxograma do circuito do Cenário B com valores de TPH, porcentagem de sólidos e P_{80} dos valores ajustados pelos modelos e simulados, são apresentados no ANEXO D.

5.3.2 CENÁRIO C

Para este cenário foi feita uma combinação dos cenários anteriores, com aumento do diâmetro das bolas do moinho e alteração na porcentagem de sólidos na respectiva alimentação. Devido à elevação da pressão na alimentação do ciclone, o diâmetro do vórtex foi aumentado de 0,255 mm para 0,290 mm. A comparação entre os resultados obtidos pela simulação e o Caso Base estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Cenário C – Granulometria do OF da classificação.

Tamanho (mm)	% P.A. - OF Classificação	
	Simulado	Caso Base
0,425	100	100
0,212	93,9	96,5
0,15	82,7	87,0
0,106	70,5	74,6
0,074	59,0	62,6
0,053	50,2	53,2
0,038	43,6	46,1

Da Tabela 7 observa-se que houve redução de 2,5 pontos percentuais na geração de finos do circuito, com a combinação dos cenários A e B e o aumento do vórtex do ciclone.

O fluxograma do circuito do Cenário C com valores de TPH, porcentagem de sólidos e P_{80} dos valores ajustados pelos modelos e simulados, estão apresentados no ANEXO D.

6 CONCLUSÃO

Os conceitos de modelos matemáticos utilizados nas operações de moagem e classificação e simulação foram aplicados de forma adequada neste trabalho.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, pois foram desenvolvidas plataformas de modelos ajustados, que constituiu o Caso Base necessário para as simulações do circuito de moagem estudado. Nos ajustes dos modelos e simulações realizadas foi possível aplicar os conceitos e analisar o funcionamento dos métodos empregados, o que resultou em um bom entendimento de suas aplicações.

Os cenários simulados neste trabalho foram realizados de forma que os objetivos pudessem ser alcançados, que eram o estudo, a aplicação e o entendimento dos métodos. Estes ainda podem ser melhorados para obtenção de cenários mais eficazes ao problema abordado, a partir de uma investigação mais detalhada envolvendo mais parâmetros operacionais que regem as operações.

Ficou clara a aplicabilidade da ferramenta matemática de simulação, a qual já está consagrada no meio de tratamento de minérios para melhorias de desempenho de operações e análise de funcionamento de circuitos industriais. Vista a quantidade de parâmetros que ela pode controlar, fica evidente a robustez desta ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTIN, L. G.; KLIMPEL, R. R. **Theory of grinding operations**. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, November, 1964. v. 56, n. 11, p. 18-29.

BOND, F. C. **Crushing and Grinding Calculations**. Allis Chalmers Publication, 1961.

CHAVES, A. P. **Classificação**. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 4. ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2012. v. 1.

CHAVES, A. P. **Britagem, Peneiramento e Moagem**. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 4. ed. São Paulo: Ed. Signus, 2009. v. 3.

CHIEREGATI, A.C. **Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

COHEN, H. E. **Energy usage in mineral processing**. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, London, 1983. v. 92, p. 160-163.

DELBONI JR., H. **Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 182 p.

DELBONI JR, H. **Modelagem e Simulação de Circuitos de Cominuição e Classificação**. Apostila do curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

EPSTEIN, B. **The Material Description of Certain Breakage Mechanisms Leading to the Logarithmic-Normal Distribution**. J. Franklin Inst, 1947.

FLINTOFF, B. C.; PLITT, L. R.; TURAK, A. A. **Cyclone modeling: a review of present technology**. CIM Bulletin, September, 1987. p. 39-50.

GOMES, W. L. **Integração de modelos energéticos e de balanços populacionais para simulação de moagem em moinho de bolas**. São Paulo, 2014.

GY, P. M. **Sampling of particulate materials theory and practice**. Amsterdam: Ed. Elsevier, 1982.

JKMRC – **Julius Kruttschnitt Mineral Research Center**. Queensland, Australia.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York: Ed. Wiley, 1982. 491 p.

LYNCH, A. J.; RAO, T. C. **Modelling and Scale-Up of Hydrocyclone Classifiers**. Proceedings XI Int Min Proc Congress, Cagliari, 1975.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits: their simulation, optimisation, design and control**. New York: Ed. Elsevier, 1977. 342 p.

LYNCH, A. J.; MORRELL, S. **The understanding of comminution and classification and its practical application in plant design and operation.** Comminution: theory and practice. SME, Littleton, 1992. cap. 30, p. 405-425.

NAGESWARARAO, K. **A generalized model for hydrocyclone classifiers.** AusIMM Proceedings, Parkville, December 1995. v. 2, n. 300, 21 p.

NAPIER-MUNN, T. J. *et al.* **Mineral Comminution Circuits: their operation and optimization.** Queensland (JKMRC), 1996. 413 p.

PITARD, F.F. **Minimization of sampling bias – elimination of incorrect sampling errors.** Horizontal Standard Notes. Broomfield, United States, 2010.

WHITEN, W. J. **Ball mill simulation using small calculators.** Proceedings AusIMM, 1976. p. 47-53.

APÊNDICE A

Dados de porcentagem de sólidos dos fluxos amostrados.

% Sólidos	
Alimentação Nova	89,50
M. Barras - Prod	70,30
LIMS - Alim	47,12
LIMS - MAG	71,84
LIMS - NMAG	41,21
Classificação Alim	48,21
Classificação - U/F	78,69
Classificação - O/F	24,71
Split Moinhos - Alim LIMS 10	78,69
M. Bolas - Alim	78,69
M. Bolas - Prod	75,00
LIMS 10 - NMAG	60,70
M. Bolas E - Prod	47,97
LIMS 10 - MAG	60,70

APÊNDICE B

Granulometria dos fluxos amostrados.

Tamanho (mm)	% P.A.						
	Alimentação Nova	M. Barras - Prod	LIMS - Alim	M. Bolas - Prod	M. Bolas - Alim	LIMS 10 - NMAG	M. Bolas E - Prod
76,2	100	100	100	100	100	100	100
50,8	100	100	100	100	100	100	100
25	97,4	100	100	100	100	100	100
19,05	94,5	100	100	100	100	100	100
12,7	88,5	100	100	100	100	100	100
9,5	84,7	100	100	100	100	100	100
6,35	77,3	100	100	100	100	100	100
3,35	68,0	100	100	100	100	100	100
1,68	59,1	97,3	97,3	98,2	97,5	97,0	99,6
0,85	51,8	81,8	81,8	92,4	87,1	85,7	98,1
0,425	44,9	66,1	66,1	82,8	72,6	70,9	91,8
0,212	36,4	51,6	51,6	54,1	39,6	38,5	61,3
0,15	31,3	44,5	44,5	36,2	22,3	21,6	41,2
0,106	26,4	37,6	37,6	25,3	13,3	12,8	28,9
0,074	21,9	31,0	31,0	18,5	8,7	8,4	21,3
0,053	18,7	25,8	25,8	14,4	6,3	6,1	16,6
0,038	16,9	21,6	21,6	11,5	4,9	4,7	13,2

Tamanho (mm)	% P.A.						
	LIMS - NMAG	LIMS 10 - Alim	Classificação - Alim	Classificação - U/F	Classificação - O/F	LIMS - MAG	LIMS 10 - MAG
76,2	100	100	100	100	100	100	100
50,8	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100
19,05	100	100	100	100	100	100	100
12,7	100	100	100	100	100	100	100
9,5	100	100	100	100	100	100	100
6,35	100	100	100	100	100	100	100
3,35	100	100	100	100	100	100	100
1,68	98	97	98	97	100	96	100
0,85	86,1	87,1	90,9	87,1	100	71,5	94,9
0,425	73,4	72,6	80,5	72,6	100	48,4	81,9
0,212	60,6	39,6	56,5	39,6	96,5	30,0	46,0
0,15	53,7	22,3	41,8	22,3	87,0	22,4	26,2
0,106	46,6	13,3	31,9	13,3	74,6	16,0	15,8
0,074	39,4	8,7	25,0	8,7	62,6	10,9	10,4
0,053	33,4	6,3	20,2	6,3	53,2	7,5	7,6
0,038	28,4	4,9	16,7	4,9	46,1	5,3	5,9

APÊNDICE C

Detalhes sobre os fluxos balanceados

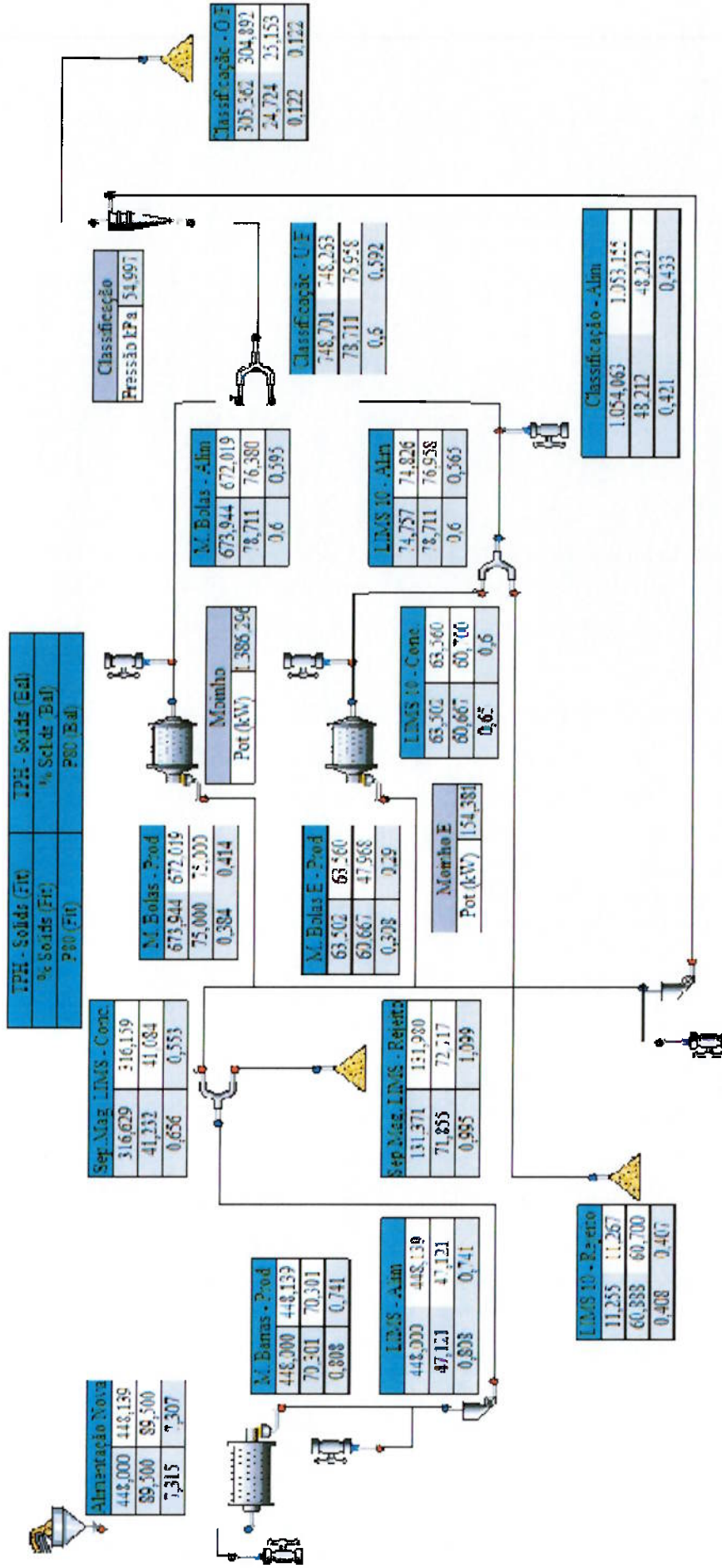
Parâmetro	Fluxo						Classificação - U/F
	Alimentação Nova	M Barras - Prod	LIMS - Alm	LIMS - MAG	LIMS - NMAG	Classificação Alm	
TPH Solids	448,00	448,00	448,00	131,80	316,20	1053,68	748,78
Solids SG [t/m³]	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
TPH Water	52,56	189,26	502,74	51,65	451,09	1131,84	202,76
% Solids	89,50	70,30	47,12	71,84	41,21	48,21	78,69
Pulp SG [t/m³]	2,60	1,94	1,48	1,98	1,40	1,50	2,18
Volumetric Flowrate [m³/h]	192,56	329,26	642,74	92,84	549,90	1461,12	436,76
% Passing 0,212 mm	27,69	51,62	51,62	30,01	60,62	56,48	39,63
80,000 % passes [mm]	7,60	0,78	0,78	1,02	0,60	0,42	0,59

Parâmetro	Fluxo							
	Classificação - O/F	Split Moínhos - Alm	LIMS 10 M	Bolas - Alm	M. Bolas - Prod	LIMS 10 - NMAG	M. Bolas E - Prod	LIMS 10 - MAG
TPH Solids	304,91	74,77		674,01	674,01	63,51	63,51	11,26
Solids SG [t/m³]	3,20	3,20		3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
TPH Water	929,07	20,25		182,52	224,67	41,12	68,89	7,29
% Solids	24,71	78,69		78,69	75,00	60,70	47,97	60,70
Pulp SG [t/m³]	1,20	2,18		2,18	2,06	1,72	1,49	1,72
Volumetric Flowrate [m³/h]	1024,36	43,61		393,15	435,30	60,97	88,73	10,81
% Passing 0,212 mm	97,81	39,63		39,63	54,09	38,50	61,25	45,97
80,000 % passes [mm]	0,11	0,59		0,59	0,39	0,64	0,31	0,41

APÊNDICE D

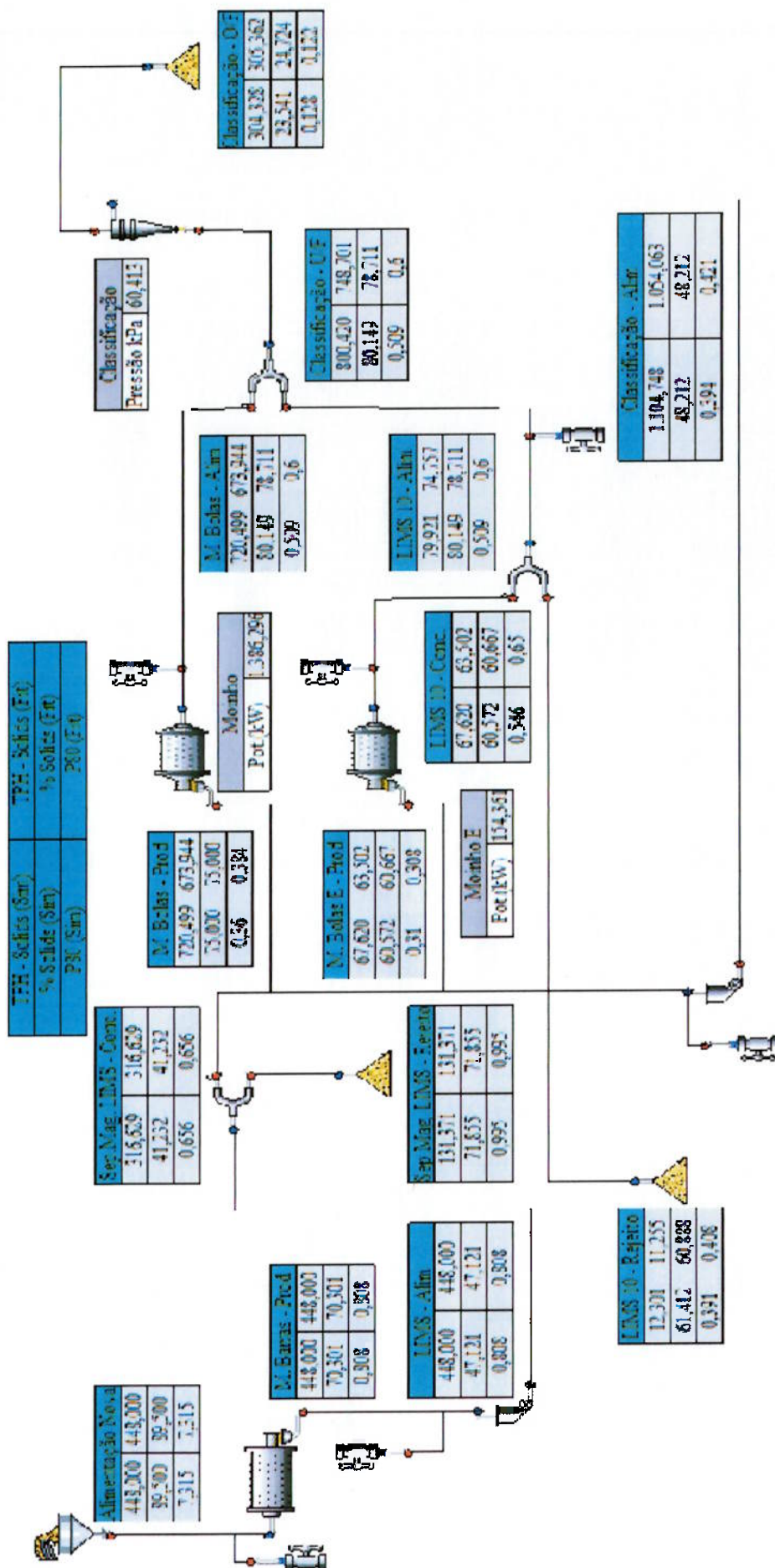
Fluxogramas: Balanço de Massas, Ajuste de Modelos e Cenários simulados

Ajuste de Modelos



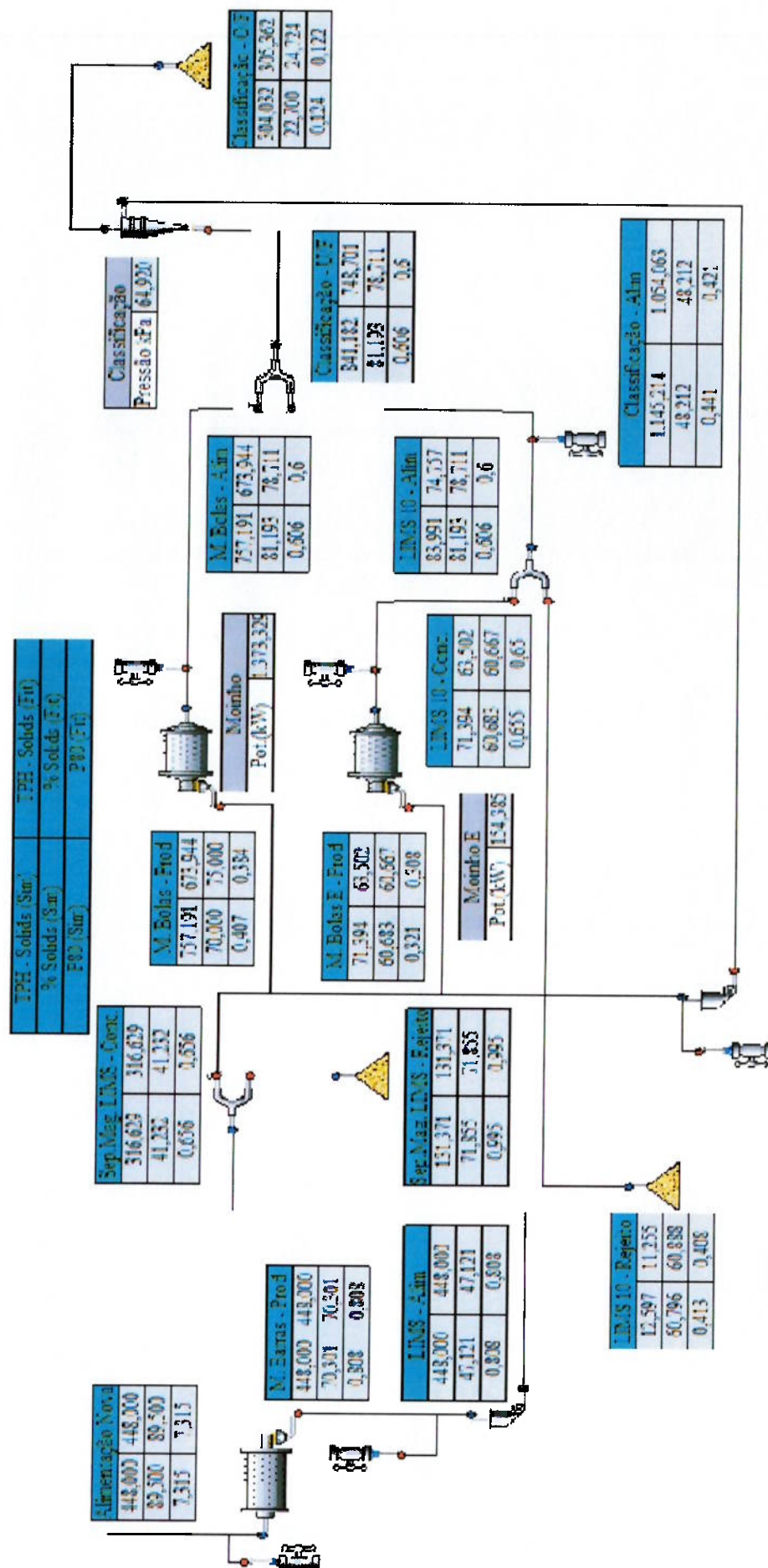
(Fonte: arquivo pessoal.)

Cenário A



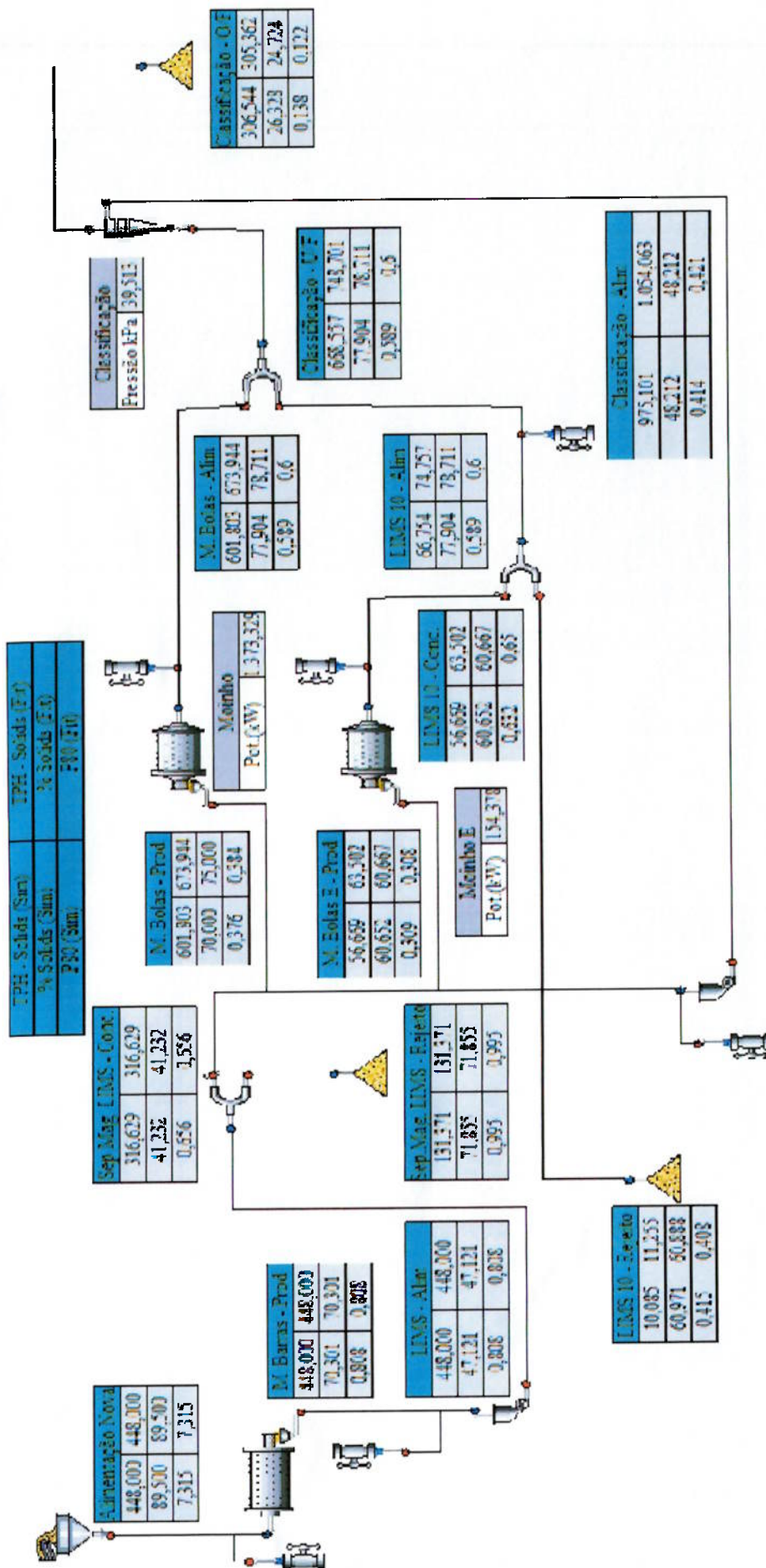
(Fonte: arquivo pessoal.)

Cenário B



(Fonte: arquivo pessoal.)

Cenário C



(Fonte: arquivo pessoal.)