

GABRIELA OUTUKI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM E
CLASSIFICAÇÃO. ESTUDO DE CASO**

São Paulo

2019

GABRIELA OUTUKI

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM E
CLASSIFICAÇÃO. ESTUDO DE CASO**

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

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

São Paulo

2019

299 1562

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

TF-2019
Ou 8m

H 2019m



Escola Politécnica - EPMI



31700002870

Catálogo-na-publicação

Outuki, Gabriela

Modelagem e simulação do circuito de moagem e classificação. Estudo de Caso / G. Outuki -- São Paulo, 2019.
89 p.

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

1. Cominuição 2. Moagem 3. Simulação I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II. t.

RESUMO

O uso de ferramentas que permitem simular e calibrar circuitos de cominuição tem como objetivo prever as características dos produtos finais e intermediários do processo. A partir de amostragens e ensaios realizados na operação da usina obtêm-se os dados do caso base e a partir dele é possível alterar parâmetros operacionais e observar quantitativamente seus efeitos, sem a necessidade de retomar diversos e custosos ensaios para cada condição a ser simulada. O estudo realizado trabalha com modelo de Misturador Perfeito (*PMM*), para moinhos de bolas e o Modelo de Nageswararao, para ciclones. O *software* utilizado para as simulações, tem como diferencial a utilização de Modelo de Estado Estacionário para a realização das análises. Esse trabalho visa estudar os efeitos de alterações de variáveis individuais de processo em um circuito de moagem fechado, a partir de amostragem e de ensaios laboratoriais de um caso base. Analisados os resultados individuais, simulações integradas foram feitas, mantendo-se o P_{80} de classificação do ciclone e aumentando a taxa de alimentação nova da usina.

Palavras-Chave: Cominuição; Modelagem; Moagem.

ABSTRACT

The use of tools that allows the simulation and calibration of comminution circuits aims to predict the characteristics of the final and intermediary products of the process. From samplings and tests performed in the plant's operation some data is obtained and from that, it's possible to change some operational parameters and quantitatively observe its effects, without the need to resume several and expensive sampling campaigns to each condition to be simulated. The focus of this work is the Perfect Mixing Model (PMM) for ball mill and Nageswararao Model for cyclones. The software used for the simulations has, as its differential, the use of the Steady State Model for the analysis. This work aims to study the effects of the changes of the individual variables of a process in a closed grinding circuit, from the samples and laboratory tests of and base case. Analyzing the individual results, integrated simulations were performed, maintaining the P_{80} classification of cyclones and increasing the circuit solid feed rate.

Keywords: Comminution; Modeling; Grinding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo esquemático de curva de partição experimental	21
Figura 2 – Tipos de Descarga	24
Figura 3 – Fluxograma de Processo – Caso Base	26
Figura 4 – Fluxograma do Processo – Simulação A	33
Figura 5 - Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação A	35
Figura 6 - Fluxograma do Processo – Simulação B	36
Figura 7 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação B.....	38
Figura 8 – Fluxograma do Processo – Simulação C	40
Figura 9 - Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação C	41
Figura 10 – Fluxograma do Processo – Simulação D	43
Figura 11 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação D	44
Figura 12 – Fluxograma do Processo – Simulação E	46
Figura 13 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação E.....	47
Figura 14 – Fluxograma do Processo – Simulação F.....	49
Figura 15 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação F	50
Figura 16 – Fluxograma do Processo – Simulação G	52
Figura 17 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação G	53
Figura 18 – Fluxograma do Processo – Simulação H	55
Figura 19 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação H	56
Figura 20 – Fluxograma do Processo – Simulação I.....	58
Figura 21 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação I.....	59
Figura 22 – Fluxograma do Processo – Simulação J	61
Figura 23 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação J	62
Figura 24 – Fluxograma do Processo – Simulação K	64
Figura 25 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação K.....	65
Figura 26 – Fluxograma do Processo – Simulação L.....	67
Figura 27 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação L.....	68
Figura 28 – Fluxograma do Processo – Simulação M.....	69
Figura 29 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação M.....	71
Figura 30 – Fluxograma de Processo – Simulação N	72
Figura 31 – Fluxograma de Processo – Ajuste da Simulação N	73
Figura 32 – Fluxograma de Processo – Aumento de 6%	75

Figura 33 – Fluxograma de Processo – Aumento 9%	76
Figura 34 – Fluxograma de Processo – Aumento de 12%	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Balanço de Massa do Processo – Caso Base.....	27
Tabela 2 – Dimensões e Variáveis Operacionais dos Moinhos – Caso Base	28
Tabela 3 – Dimensões e Variáveis Operacionais da Bateria de Ciclones – Caso Base	28
Tabela 4 – Desempenho da Moagem	30
Tabela 5 – Desempenho da Classificação	31
Tabela 6 – Comparação Caso Base e Simulação A	34
Tabela 7 - Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação A	35
Tabela 8 - Comparação Caso Base e Simulação B	37
Tabela 9 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação B.....	38
Tabela 10 – Comparação Caso Base e Simulação C	40
Tabela 11 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação C	42
Tabela 12 – Comparação Caso Base e Simulação D	43
Tabela 13 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação D	45
Tabela 14 - Comparação Caso Base e Simulação E	46
Tabela 15 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação E.....	48
Tabela 16 – Comparação Caso Base e Simulação F.....	49
Tabela 17 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação F.....	51
Tabela 18 – Comparação Caso Base e Simulação G	52
Tabela 19 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação G	54
Tabela 20 – Comparação Caso Base e Simulação H	55
Tabela 21 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação H	57
Tabela 22 – Comparação Caso Base e Simulação I.....	59
Tabela 23 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação I.....	60
Tabela 24 – Comparação Caso Base e Simulação J	61
Tabela 25 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação J	63
Tabela 26 – Comparação Caso Base e Simulação K	64
Tabela 27 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação K.....	66
Tabela 28 – Comparação Caso Base e Simulação L.....	67
Tabela 29 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação L.....	69
Tabela 30 – Comparação Caso Base e Simulação M.....	70
Tabela 31 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação M.....	71

Tabela 32 – Comparação Caso Base e Simulação N	73
Tabela 33 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação N	74
Tabela 34 – Comparação Caso Base e Aumento de 6%	76
Tabela 35 – Comparação Caso Base e Aumento de 9%	77
Tabela 36 – Comparação Caso Base e Aumento 12%	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	MOAGEM.....	14
3.1.1.	Modelo de Estado Estacionário	15
3.1.1.1.	Modelo de Balanço Populacional	15
3.1.1.2.	Modelo do Misturador Perfeito	17
3.2.	CLASSIFICAÇÃO.....	19
3.2.1.	Curvas de Partição	20
3.2.2.	Modelo de Nageswararao.....	22
3.2.3.	Tipos de Descarga.....	23
4	CIRCUITO INDUSTRIAL SELECIONADO	25
4.1.	CASO BASE	25
4.1.1.	Análises de Desempenho.....	29
5	RESULTADOS	32
5.1.	ALTERAÇÕES NA CLASSIFICAÇÃO.....	32
5.1.1.	Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone	32
5.1.1.1.	Aumento da Concentração de Sólidos – Simulação A.....	33
5.1.1.2.	Ajuste da Simulação A	34
5.1.1.3.	Diminuição da Concentração de Sólidos – Simulação B	36
5.1.1.4.	Ajuste da Simulação B	37
5.1.2.	Pressão de Operação do Ciclone.....	39
5.1.2.1.	Três Ciclones em Operação – Simulação C	39
5.1.2.2.	Ajuste da Simulação C	41
5.1.2.3.	Cinco Ciclones em Operação – Simulação D	42

5.1.2.4.	Ajuste da Simulação D	44
5.1.3.	Diâmetro do Apex	45
5.1.3.1.	Aumento do Diâmetro do Apex – Simulação E	45
5.1.3.2.	Ajuste da Simulação E	47
5.1.3.3.	Diminuição do Diâmetro do Apex – Simulação F	48
5.1.3.4.	Ajuste da Simulação F	50
5.1.4.	Diâmetro do Vortex	51
5.1.4.1.	Diminuição do Diâmetro do Vortex – Simulação G	51
5.1.4.2.	Ajuste da Simulação G	53
5.1.4.3.	Aumento do Diâmetro do Vortex	54
5.1.4.4.	Ajuste da Simulação H	56
5.2.	ALTERAÇÕES NOS MOINHOS DE BOLAS	57
5.2.1.	Concentração de Sólidos de Polpa de Alimentação do Moinho	57
5.2.1.1.	Aumento na Concentração de Sólidos – Simulação I	58
5.2.1.2.	Ajuste da Simulação I	59
5.2.1.3.	Diminuição na Concentração de Sólidos – Simulação J	60
5.2.1.4.	Ajuste da Simulação J	62
5.2.2.	Tamanho de Bolas	63
5.2.2.1.	Aumento do Tamanho de Bola	63
5.2.2.2.	Ajuste da Simulação K	65
5.2.3.	Grau de Enchimento no Moinho	66
5.2.3.1.	Aumento do Grau de Enchimento – Simulação L	66
5.2.3.2.	Ajuste da Simulação L	68
5.2.3.3.	Aumento do Grau de Enchimento – Simulação M	69
5.2.3.4.	Ajuste da Simulação M	70
5.2.4.	Velocidade Crítica	72
5.2.4.1.	Aumento na Velocidade Crítica – Simulação N	72

5.2.4.2. Ajuste da Simulação N.....	73
5.3. SIMULAÇÕES INTEGRADAS – AUMENTO DE VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO NOVA NO CIRCUITO	74
5.3.1. Aumento de 6%	75
5.3.2. Aumento de 9%	76
5.3.3. Aumento de 12%	77
6 CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de mineração, o processamento de minérios é uma etapa praticamente imprescindível para que o produto possa ser aproveitado na sequência da cadeia industrial. O tratamento de minerais consiste em operações unitárias de redução de tamanhos, separação de tamanhos, separação de espécies minerais e separação de sólidos e líquidos a fim de obter-se um produto concentrado dentro das especificações do mercado (CHAVES, 2006).

A redução e separação de tamanhos, apesar de parte essencial para a liberação e concentração do bem mineral é também uma das etapas de maior consumo energético numa usina. Dos custos operacionais totais de uma usina, grande parte é utilizado para a fragmentação do minério, de acordo com LUZ *et al.* (2018).

A fim de melhorar o processo de beneficiamento e torná-lo economicamente viável é importante dimensionar e calibrar o sistema de moagem e mantê-lo sempre atualizado. O método proposto por Bond (em 1952) para dimensionamento de moinhos é restrito a algumas configurações de circuito, enquanto que a modelagem matemática e simulação apresenta maior espectro de utilização, não só para dimensionar equipamentos, como para tornar o processo mais eficiente por meio de alterações em parâmetros de operação sem a necessidade de realizar custosos ensaios na usina. A modelagem matemática em circuitos industriais é atualmente uma prática importante e bem difundida dentro da mineração, mostrando-se de extrema utilidade para a indústria.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo simular um circuito industrial de moagem, a partir de um caso base, a fim de determinar um cenário que apresente melhora significativa do processo de cominuição.

O método de trabalho consistiu na análise do assim denominado Caso Base, sendo ele o produto da campanha de amostragem realizada na usina objeto dos trabalhos, seguida de tratamento de amostras, balanço de massa e modelagem matemática. Ou seja, o presente trabalho parte do Caso Base, conforme estabelecido por meio do simulador *JKSimMet*, como plataforma para a realização das simulações de processo descritas nesse documento.

As simulações iniciais foram realizadas para estabelecer os resultados de cada mudança, permitindo direcionar as alterações de parâmetros para um cenário otimizado, no caso, um circuito com aumento considerado significativo de vazão de alimentação, conforme o P_{80} do produto da etapa de moagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho inclui os tópicos moagem e classificação, assim como os modelos matemáticos empregados.

3.1. MOAGEM

A moagem é o último estágio de circuitos de cominuição, cujo objetivo é gerar produtos que atendam a especificações estipuladas em função da aplicação. Circuitos industriais de cominuição incluem geralmente uma etapa de britagem e moagem.

Na moagem, três mecanismos de fragmentação estão presentes no processo, compressão, impacto e abrasão. A energia aplicada a partículas individuais é pequena, em compensação a energia total do processo deve ser elevada. Kelly e Spottiswood, 1982, afirmam que moinhos devem ser capazes de dispensar energia sobre maiores áreas de partículas quando comparados a britadores.

São bastante empregados moinhos cilíndricos de carga cadente contendo corpos moedores que podem ser formados por barras ou bolas de aço, por exemplo. O processo pode ser via seca ou úmida e os circuitos abertos ou fechados, cada um com suas especificações, vantagens e desvantagens. Os equipamentos variam em dimensões e potência instalada, além das variáveis operacionais, como grau de enchimento, velocidade de rotação e concentração de sólidos na alimentação.

A velocidade de rotação do moinho e o enchimento com corpos moedores influenciam a movimentação da carga do moinho, resultando em movimentos de catarata ou cascata, responsáveis pela fragmentação. A velocidade correspondente à centrifugação completa de um corpo moedor é denominada velocidade crítica, quanto maior o grau de enchimento, menor a velocidade de rotação para que isto ocorra (GOMES, 2014). O tamanho dos corpos moedores também influencia a potência dos moinhos, de acordo com Rowland Jr. e Kjos (1983).

Uma das formas de calcular a eficiência da moagem é por meio da fórmula de Rowland (1976 *apud* BERALDO, 1987), sendo definida como a razão entre o *Work Index* de laboratório e o *Work Index* operacional, sendo o $W_{\text{operacional}}$ calculado de acordo com a equação 1:

$$WI_{op} = \frac{P}{Q \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (1)$$

Onde:

- WI_{op} é o WI operacional (kWh/t);
- P é a potência do motor do moinho (kW);
- Q é a vazão de sólidos de alimentação nova no circuito (t/h);
- P_{80} representa o tamanho de partículas cuja fração representa 80% de massa passante no *overflow* (μm) e
- F_{80} em uma distribuição granulométrica, é o tamanho de partícula que equivale a 80% passante (μm).

Embora o método tradicional de Bond e Rowland represente um recurso útil, a modelagem matemática permite uma abordagem mais abrangente e detalhada do circuito de moagem, conforme descrita nas próximas seções.

3.1.1. Modelo de Estado Estacionário

A partir do Modelo de Balanço Populacional de Epstein (1947) duas vertentes foram derivadas, são elas o Modelo do Misturador Perfeito proposto por Withen (1976) e o modelo cinético proposto por Austin (1974). Ambos são mais comumente utilizados, mesmo necessitando de dados de circuitos já existentes para determinação de parâmetros.

3.1.1.1. Modelo de Balanço Populacional

A equação de balanço populacional, desenvolvida inicialmente por Epstein em 1947, permite descrever o comportamento operacional dos moinhos, uma vez que ajuda no desenvolvimento de um modelo que o descreve. A fórmula assume que a massa de material descarregado do moinho em uma determinada faixa granulométrica é proporcional à quantidade de partículas na mesma faixa dentro do moinho e essa

constante de proporcionalidade difere para cada fração granulométrica, como representado pela equação 2:

$$m_i = k_i \cdot s_i \quad (2)$$

Onde:

- m_i é a massa moída da fração granulométrica i (t/h);
- k_i é a taxa de quebra da fração i (1/h) e
- s_i é a massa da fração granulométrica i dentro do moinho (t).

O modelo calcula o balanço de massa baseado em cada uma das frações granulométricas. Para isto é necessário fazer algumas considerações sobre a alimentação e o produto da moagem, onde a soma da alimentação com a quebra das frações maiores para a fração estudada deve igualar ao produto mais a quebra da fração considerada, pela equação 3, tem-se:

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot k_j \cdot s_j = p_i + k_i \cdot s_i \quad (3)$$

Onde:

- f_i representa a vazão da alimentação nova para a fração i (t/h);
- b_{ij} é a função de quebra, uma matriz triangular inferior e representa a porcentagem da fração j que é quebrada, indo para a fração i ;
- k_j é a taxa de quebra da fração granulométrica j (1/h);
- s_j é a massa da fração j -ésima no interior do moinho (t);
- p_i é a vazão de sólidos na fração i no produto (t/h);
- k_i é a função taxa de quebra da fração i (1/h) e
- s_i é a massa da i -ésima fração granulométrica no interior do moinho.

A partir da função quebra e as vazões em cada fração granulométrica na alimentação, na carga do moinho e no produto é possível estimar os parâmetros k_i .

3.1.1.2. Modelo do Misturador Perfeito

O texto desta seção foi feito baseando-se em Napier-Munn *et al.* (1996).

O PMM (*Perfect Mixing Model*) é considerado um caso particular do modelo de balanço populacional. Ao se considerar que a carga do moinho está perfeitamente misturada, esta pode ser relacionada com o produto através de uma taxa de descarga. Neste caso, a taxa de descarga d_i (1/h) correlaciona o produto da moagem com a carga de minério do interior do moinho como mostrado na equação 4:

$$p_i = d_i \cdot s_i \quad (4)$$

Na equação de balanço de massa do moinho, tem-se a equação 5:

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

Onde:

- r_i é a taxa de quebra na i -ésima fração granulométrica e
- a_{ij} é a função de quebra, uma matriz triangular inferior e representa a porcentagem da fração j que é quebrada, indo para a fração i .

Substituindo-se ainda a relação de taxa de descarga na equação de balanço (3), chega-se à relação 6:

$$f_i + \sum_{j=1}^i \left[\frac{a_{ij} \cdot r_j \cdot p_j}{d_j} \right] = p_i + \frac{r_i \cdot p_i}{d_i} \quad (6)$$

Para cada fração granulométrica pode-se determinar um parâmetro r_i/d_i . Dividir o quociente r/d pelo tempo de residência médio dentro do moinho, normaliza seu valor

e, portanto, torna possível escalonar equipamento e vazões de alimentação diferentes, como mostrado pela equação 7.

$$\frac{r_i}{d_i} = \left(\frac{D^2 \cdot L}{4 \cdot Q} \right) \cdot \frac{r_i}{d_i^*} \quad (7)$$

Onde:

- r_i/d_i é a razão entre a taxa de quebra e a taxa de descarga para a fração granulométrica i ;
- D é o diâmetro interno do moinho (m);
- L é o comprimento interno do moinho (m);
- Q é a vazão volumétrica da alimentação (m^3/h) e
- r_i/d_i^* representa o parâmetro r_i/d_i normalizado.

A relação 8 mostra como o parâmetro taxa de quebra normalizada r/d^* , pode ser simulado em função de variáveis operacionais do moinho:

$$\left(\frac{r_i}{d_i^*} \right)_{simulado} = (Fator\ de\ escala) \cdot \left(\frac{r_i}{d_i^*} \right)_{calibrado} \quad (8)$$

Os fatores de escala das variáveis são as seguintes, equações de 9 a 14 (DELBONI JR., 2012):

$$F_A = \sqrt{\frac{D_{sim}}{D_{ajus}}} \quad (9)$$

$$F_B = \left[\frac{(1 - GE_{sim}) \cdot GE_{sim}}{(1 - GE_{ajus}) \cdot GE_{ajus}} \right] \quad (10)$$

$$F_C = \frac{Vel_{sim}}{Vel_{ajus}} \quad (11)$$

$$F_D = \left(\frac{WI_{sim}}{WI_{ajus}} \right)^{0,8} \quad (12)$$

$$F_E = \left(\frac{Db_{sim}}{Db_{ajus}} \right)^2, \text{ se } X > X_{max} \cdot (r/d^* \sim Db) \quad (13)$$

$$F_E = \left[\left(\frac{1}{Db_{sim}} \right) / \left(\frac{1}{Db_{ajus}} \right) \right], \text{ se } X < X_{max} \cdot (r/d^* \sim 1/Db) \quad (14)$$

Onde:

- *Sim* se refere às variáveis simuladas;
- *Ajus* se refere às variáveis calibradas;
- F_A é o efeito do diâmetro do moinho;
- F_B é o efeito do Grau de Enchimento do moinho;
- GE é o grau de enchimento do moinho;
- F_C é o efeito da Velocidade do moinho;
- Vel é a porcentagem de velocidade crítica;
- F_D é o efeito do WI do minério;
- WI é o *Work Index* de Bond para moinho de bolas;
- F_E é o efeito diâmetro de bolas;
- Db é o diâmetro de bolas de reposição;
- X_{max} é o tamanho no qual ocorre a máxima taxa de quebra e
- X_i é o tamanho estudado.

3.2. CLASSIFICAÇÃO

Circuitos de moagem são dimensionados e operados para que os respectivos produtos atendam a determinadas especificações. Para tanto, adota-se configuração fechada com equipamentos de classificação, cujo objetivo é a separação de populações de partículas em frações de tamanhos distintos, gerando fluxo de saída controlado e recirculação do material que não se encontra dentro das especificações.

A ciclonagem é uma operação de classificação usada, em geral, para fechar o circuito de moagem, dimensionado de forma que o produto do circuito esteja de acordo com o tamanho estipulado, enquanto o produto grosseiro retorne ao moinho. Os ciclones são classificadores hidráulicos e seu princípio básico de separação é a sedimentação centrífuga, baseado na diferença da velocidade de sedimentação entre partículas num campo centrífugo.

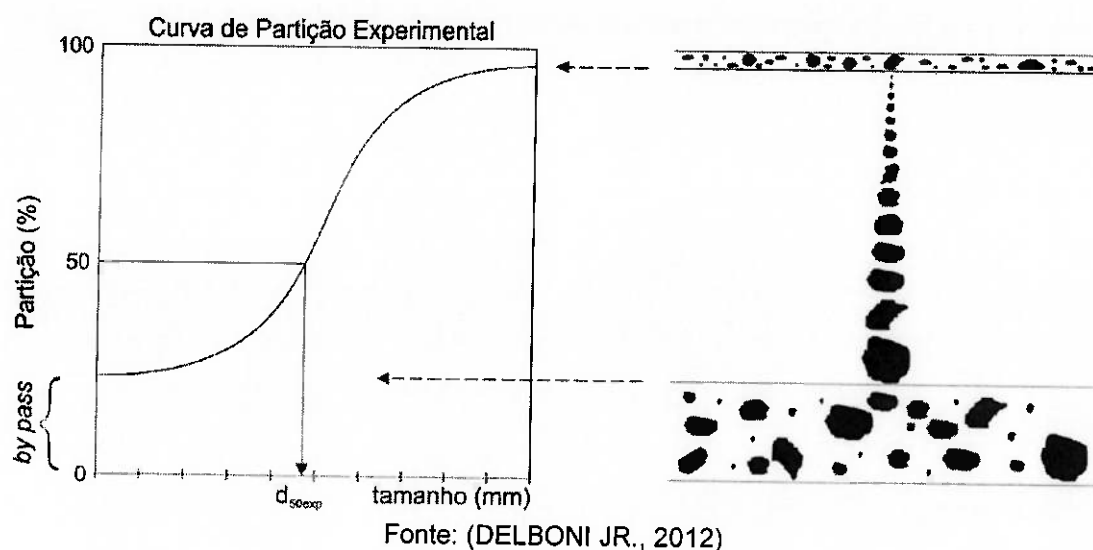
Um ciclone convencional consiste em uma câmara cilíndrico-cônica com entrada tangencial e duas saídas. A polpa é injetada sob pressão em um duto situado na parte superior da câmara criando um redemoinho. Todas as partículas mais grossas e mais densas são arremessadas às paredes e descarregadas pelo *apex*, constituindo o *underflow*. Já as partículas mais finas, menos densas juntamente com grande parte da fase líquida são dirigidas para o centro do ciclone e saem pela parte cilíndrica do aparelho, denominado *vortex finder*, constituindo o *overflow*. (LUZ *et al.*, 2018)

As principais variáveis operacionais que influenciam na classificação dos ciclones são a concentração e a distribuição granulométrica dos sólidos na alimentação, a forma das partículas, a pressão da alimentação, a viscosidade da polpa e a densidade da polpa de acordo com LUZ *et al.* (2018). Os modelos matemáticos de ciclones determinam como os parâmetros de operação modificam as características do *overflow* e do *underflow*, permitindo estimar os valores de ambos.

3.2.1. Curvas de Partição

De acordo com King (2001), classificadores 100% eficientes não existem, pois sempre haverá uma parcela de partículas grossas junto à fração que deveria ser fina e vice-versa. Para realização de uma análise quantitativa da classificação utiliza-se as curvas de partição, uma curva bicaudal que representa a nitidez do processo de classificação e é construída a partir do cálculo da partição de cada faixa granulométrica. A Figura 1 representa uma curva de partição experimental.

Figura 1 – Modelo esquemático de curva de partição experimental



A curva de partição não passa pela origem e nem pelo ponto 100%, ambos denominados curto-circuito ou *by-pass*. Partículas finas apresentam menor resistência ao arraste da água, permitindo que o *by-pass* ocorra. Kelsall (1953) propôs que de cada fração granulométrica seja subtraída a partição de água do ciclone, a fim de obter a curva de partição corrigida. A equação 15 é utilizada para obter a partição corrigida:

$$P_{ci} = \frac{P_{ri} - R_f}{1 - R_f} \quad (15)$$

Onde:

- P_{ci} = Partição corrigida da fração i ;
- P_{ri} = Partição real da fração i e
- R_f = Partição de água para o *underflow*.

A partição corrigida representa a probabilidade de uma partícula de tamanho i ser direcionada para o produto que contém prioritariamente grossos, neste caso o *underflow*. O d_{50} é o diâmetro no qual as partículas têm 50% de chance de serem encaminhadas para cada um dos dois produtos da separação. O parâmetro d_{50c} da

curva de partição corrigida é análogo ao d_{50} da curva experimental. Além disso, a inclinação das curvas de partição representa a nitidez da separação.

3.2.2. Modelo de Nageswararao

O modelo de Nageswararao, de 1978, foi elaborado com base em dados experimentais e engloba quatro equações (equações 16, 17, 18 e 19) para o cálculo do diâmetro mediano de partição, da partição de água, da partição de polpa e da vazão volumétrica. A partir disso é possível criar a curva de partição corrigida e obter o d_{50c} , que são usados para calibrar os parâmetros K_{D0} , K_{W1} , K_{V1} e K_{Q0} do modelo.

O modelo é baseado na premissa de que a curva de partição é função de uma faixa restrita de condições de operação do ciclone e é válida para hidrociclones que possuem relações geométricas que seguem proporções estipuladas. Para calibração do modelo é necessário realizar-se ao menos um ensaio para determinação da densidade do minério, da vazão, da granulometria e da porcentagem de sólidos da alimentação, *overflow* e *underflow* (GOMES, 2014).

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

$$R_f = K_{W1} \cdot \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0,5} \cdot \theta^{-0,24} \cdot \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0,22} \cdot \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1,19} \cdot \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^{2,4} \cdot \lambda^{0,27} \cdot \left(\frac{P}{\rho_p \cdot g \cdot D_c}\right)^{-0,53} \quad (17)$$

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

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

Onde:

- d_{50c} é o diâmetro corrigido no qual as partículas têm 50% de chance de ir para cada um dos dois produtos da separação;
- D_i é o diâmetro do *inlet* (m);
- D_o é o diâmetro do *vortex* (m);
- D_u é o diâmetro do *apex* (m);
- D_c é o diâmetro do ciclone (m);
- L_c é o comprimento da seção cilíndrica (m);
- θ é o ângulo da seção cônica (graus);
- P é a pressão na entrada do ciclone (kPa);
- ρ_p é a densidade da polpa da alimentação (t/m^3);
- g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);
- Q_f é a vazão volumétrica da polpa (m^3/h);
- R_f é a recuperação de água para o underflow (%);
- R_v é a recuperação de polpa para o underflow (%);
- K são os parâmetros do modelo;
- λ é o fator de correção em razão da diferença de velocidade terminal livre e velocidade de sedimentação. Dado em função da concentração volumétrica de sólidos (C_v) como apresentado na equação 20:

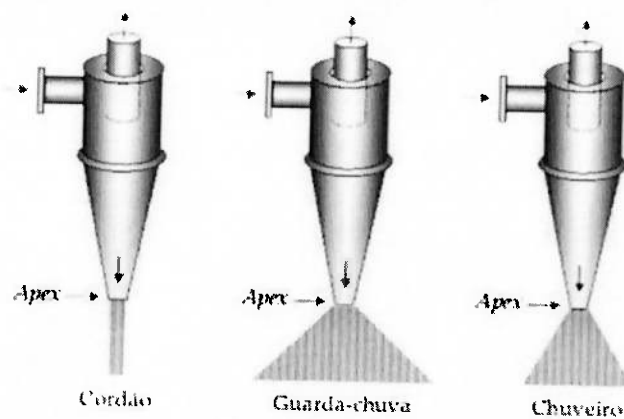
$$\lambda = \frac{10^{1,82C_v}}{8,05} \quad (20)$$

Inicialmente, determinam-se os valores dos parâmetros K para então alterar outras variáveis do ciclone para analisar as características do *overflow* e *underflow* simulados (NAPIER-MUNN, 1996).

3.2.3. Tipos de Descarga

Dependendo do tipo de descarga do fluxo de polpa pelo *apex*, pode-se avaliar as condições de operação do ciclone. Os três tipos de descarga são: em cordão, em cone e em *spray*. Conforme mostrados na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de Descarga

Fonte: LUZ *et al.*, 2018

A descarga em cordão, apresenta um diâmetro de *apex* relativamente pequeno para a aplicação. A descarga em chuveiro ou cone é aquela considerada adequada ao trabalho. A descarga em guarda-chuva ou *spray* apresenta um diâmetro de *apex* relativamente maior que o recomendável para a aplicação específica.

4 CIRCUITO INDUSTRIAL SELECIONADO

O circuito industrial selecionado refere-se a uma operação brasileira que processa minério de fosfato. Por razões de sigilo, o nome da empresa foi omitido neste trabalho. Trata-se de uma operação consolidada, na qual a empresa HDA Serviços realizou um trabalho de otimização de desempenho, cuja base foi a amostragem na mesma usina, da qual resultou o Caso Base que se segue.

4.1. CASO BASE

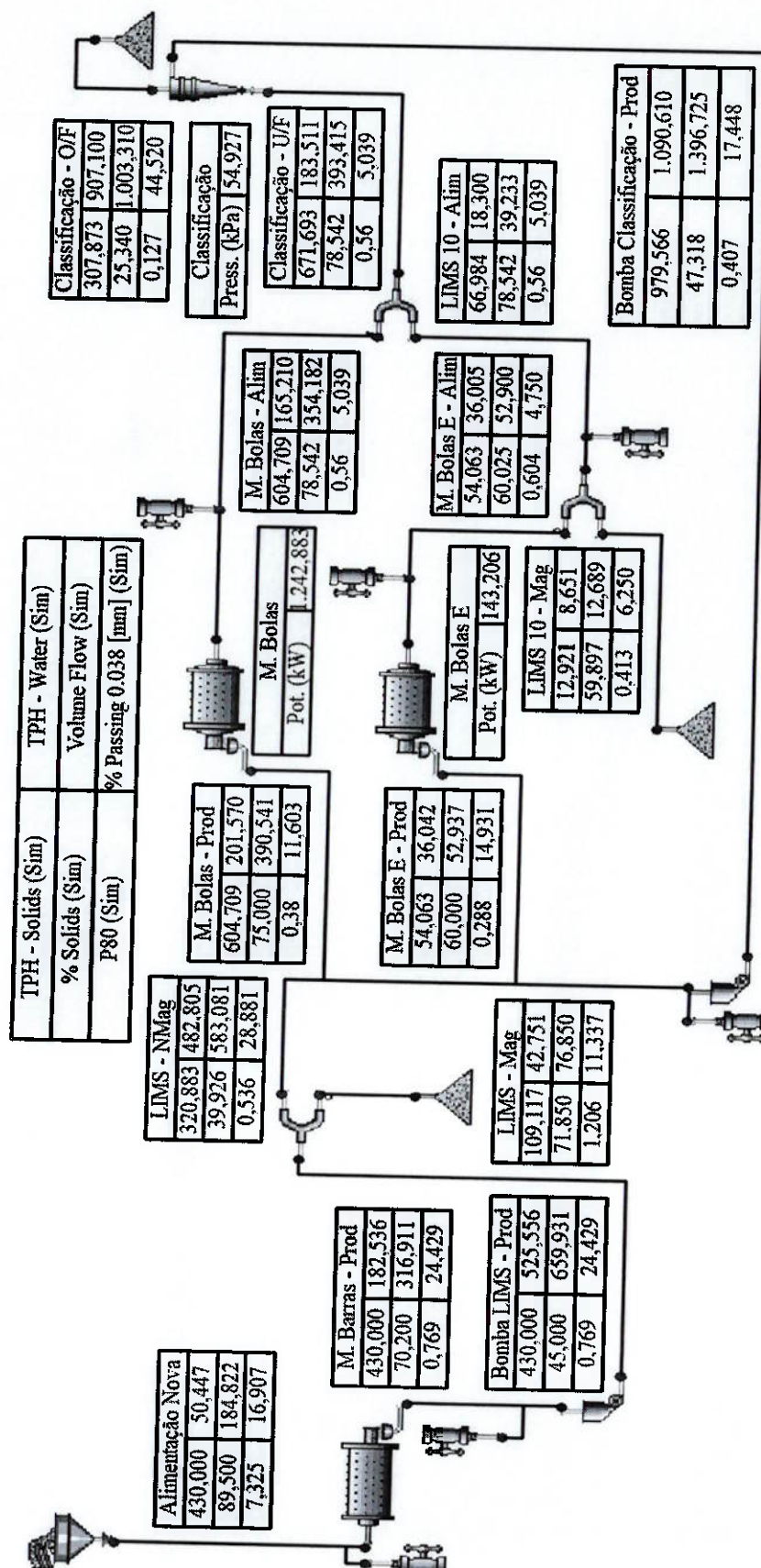
O circuito de moagem selecionado para este trabalho inclui duas etapas de moagem, intercaladas por estágio de separação magnética. Assim, a alimentação nova é encaminhada juntamente com adição de água a um moinho de barras, que opera em configuração aberta. A descarga do moinho é bombeada para separadores magnéticos de baixa intensidade, de forma a descartar a maior parte da magnetita contida no minério.

O produto não magnético dos separadores é bombeado para a etapa secundária de moagem configurada em circuito fechado e reverso com dois moinhos de bolas. Nesta etapa, o *overflow* da bateria de ciclones forma o produto final do circuito, enquanto o *underflow* é dividido em dois fluxos. O primeiro segue para um moinho de bolas e o segundo para uma etapa adicional de separação magnética de baixa intensidade, cuja fração não-magnética flui para o segundo moinho de bola. Os produtos de ambos os moinhos vertem para a mesma caixa de bomba que alimenta a ciclonagem, fechando assim a etapa secundária de moagem.

A vazão de alimentação nova de sólidos do circuito foi calculada em 430 t/h com P_{80} de 7,3 mm. Analogamente a vazão de sólidos do *overflow* dos ciclones foi calculada em 308 t/h, com P_{80} de 0,127 mm.

A Figura 3 apresenta um fluxograma do processo descrito, incluindo um sumário do balanço de massas obtidos. Já a Tabela 1 apresenta o balanço de massas completo referente ao Caso Base, incluindo vazão de sólidos, água e polpa, concentração de sólidos e densidade de polpa, além de distribuições granulométricas correspondentes a cada fluxo do circuito do Caso Base.

Figura 3 – Fluxograma de Processo – Caso Base



Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

Tabela 1 – Balanço de Massa do Processo – Caso Base

Variáveis	Moinho de Barras		LIMS			Moinhos de Bolas		LIMS 10			Moinhos de Bolas E		Classificação		
	Alimentação	Produto	Alimentação	Magnético	Não-Magnético	Alimentação	Produto	Alimentação	Magnético 10	Não-Magnético 10	Alimentação	Produto	Alimentação	Underflow	Overflow
Vazão de Sólidos (t/h)	430	430	430	109	321	605	605	67	13	54	54	54	980	672	308
Recuperação mássica (%)	100.0	100.0	100.0	25.4	74.6	140.8	140.8	15.6	3.0	12.6	12.6	12.6	228.0	156.3	71.6
Vazão de Água (t/h)	50	183	526	43	483	165	202	18	9	36	36	36	1091	183	908
% Sólidos	89.5	70.2	45.0	71.9	39.9	78.6	75.0	78.6	59.9	60.0	60.0	60.0	47.3	78.6	25.3
Densidade de Polpa (t/m ³)	2.80	1.93	1.45	1.98	1.38	2.17	2.06	2.17	1.70	1.70	1.70	1.70	1.48	2.17	1.21
Vazão de Polpa (m ³ /h)	185	317	660	77	583	354	391	39	13	53	53	53	1398	394	1004
P ₈₀ (mm)	7.325	0.769	0.769	1.206	0.536	0.560	0.380	0.560	0.413	0.684	0.604	0.288	0.407	0.560	0.127
% Passante em 0,212 mm	36.4	51.3	51.3	27.5	59.4	40.2	56.2	40.2	47.0	38.6	38.6	65.6	57.8	40.2	96.0
% Passante em 0,106 mm	26.4	37.9	37.9	18.7	44.4	13.7	25.9	13.7	16.6	13.0	13.0	32.1	32.3	13.7	73.0
% Passante em 0,020 mm	11.3	16.8	16.8	7.4	20.2	3.2	7.6	3.2	4.0	3.0	3.0	9.9	12.6	3.2	32.6
Tamanho (mm)	Porcentagem Passante Acumulada														
76.20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50.80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25.40	97.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19.05	94.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12.70	88.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9.50	84.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6.350	77.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3.350	67.9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.680	59.1	97.9	97.9	93.0	99.5	99.3	99.5	99.3	99.9	99.1	99.1	99.8	99.5	99.3	100
0.850	51.8	82.2	82.2	61.1	89.3	89.1	93.7	89.1	95.1	87.6	87.6	98.4	92.5	89.1	100
0.425	44.9	65.7	65.7	39.9	74.4	72.8	84.0	72.8	81.3	70.8	70.8	93.4	81.4	72.8	100
0.212	36.4	51.3	51.3	27.5	59.4	40.2	56.2	40.2	47.0	38.6	38.6	65.6	57.8	40.2	96.0
0.150	31.4	44.4	44.4	22.7	51.7	23.0	37.8	23.0	27.5	22.0	22.0	45.4	42.8	23.0	85.8
0.106	26.4	37.9	37.9	18.7	44.4	13.7	25.9	13.7	16.6	13.0	13.0	32.1	32.3	13.7	73.0
0.074	21.9	31.9	31.9	15.3	37.6	8.8	18.7	8.8	10.8	8.4	8.4	23.7	25.2	8.8	60.9
0.053	18.7	27.6	27.6	12.9	32.5	6.4	14.5	6.4	7.9	6.1	6.1	18.6	20.6	6.4	51.6
0.038	16.9	24.4	24.4	11.3	28.9	5.0	11.6	5.0	6.2	4.7	4.7	14.9	17.4	5.0	44.5

Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

As dimensões e principais condições operacionais do moinho de barras e dos dois moinhos de bolas são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2 – Dimensões e Variáveis Operacionais dos Moinhos – Caso Base

Variáveis	Moinho de Barras	Moinho de Bolas	Moinho de Bolas E
Tipo	Barras	Bolas	Bolas
Diâmetro Interno ao Revestimento (m)	3.30	4.27	1.70
Comprimento Interno ao Revestimento (m)	4.80	4.72	4.70
% Velocidade Crítica	74	70	71
Grau de Enchimento (%)	35	28	35
Tamanho da Bola de Reposição (mm)	-	40	40
Tipo de Descarga	overflow	diafragma	diafragma
Potência Instalada individual (kW)	883	1641	294
Potência Aplicada individual (kW)	722	1243	143

Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

Já as dimensões e variáveis operacionais referentes à bateria de ciclones estão mostradas na Tabela 3:

Tabela 3 – Dimensões e Variáveis Operacionais da Bateria de Ciclones – Caso Base

Variáveis	Classificação
Diâmetro Nominal (mm)	650
Diâmetro do <i>Inlet</i> (mm)	211
Diâmetro do <i>Vortex</i> (mm)	255
Diâmetro do <i>Apex</i> (mm)	125
Ângulo da Seção Cônica (graus)	20
Número de Baterias	1
Número de Ciclones Instalados por Bateria	4
Número de <i>Canister</i> por Bateria	-
Número de Ciclones por <i>Canister</i>	-
Número de Ciclones Instalados Total	4
Número de Ciclones em Operação	4
Pressão de Operação (kPa)	55

Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

4.1.1. Análises de Desempenho

O Caso Base apresenta vazão de alimentação nova de sólidos de 430 t/h. O moinho de barras indicou relação de redução de 9,5 com F_{80} e P_{80} , respectivamente de 7,32 mm e 0,77 mm, bem como consumo de energia específica de 1,68 kWh/t e WI operacional 6,9 kWh/t.

O circuito de moagem em moinho de bolas indicou relação de redução de 4,2 com F_{80} e P_{80} de 0,537 mm e 0,127 mm, respectivamente, além de carga circulante de 218%. O consumo de energia específica do circuito (potência de operação dos dois moinhos dividida pela vazão de sólidos) foi calculado em 4,50 kWh/t com WI operacional de 9,9 kWh/t.

A carga circulante, aqui calculada como a razão entre a vazão de *underflow* e de *Overflow* da Classificação, foi igual a 218%.

Foram realizados dois ensaios para a determinação do *Work Index* de Bond resultando em um WI laboratorial médio de 13,1 kWh/t.

Um resumo das variáveis para análise de desempenho da moagem está descrito na Tabela 4 .

Tabela 4 – Desempenho da Moagem

Variáveis		Moinho de Barras	Circuito de Moagem de Bolas
Vazão de Sólidos (t/h)		430	308
F ₈₀ (mm)		7.32	0.536
P ₈₀ (mm)		0.77	0.127
Relação de Redução		9.5	4.2
Carga Circulante (%)		-	218
Potência Aplicada (kW)		722	1386
Energia Específica (kWh/t)		1.68	4.50
WI Operacional (kWh/t)		6.9	9.9
% Passante na Alimentação	0,212 mm	36.4	59.4
	0,150 mm	31.4	51.7
	0,106 mm	26.4	44.4
	0,074 mm	21.9	37.6
	0,053 mm	18.7	32.5
	0,038 mm	16.9	28.9
% Passante no Produto	0,212 mm	51.3	96.0
	0,150 mm	44.4	85.8
	0,106 mm	37.9	73.0
	0,074 mm	31.9	60.9
	0,053 mm	27.6	51.6
	0,038 mm	24.4	44.5
% Passante Gerada	0,212 mm	14.9	36.6
	0,150 mm	13.0	34.1
	0,106 mm	11.5	28.6
	0,074 mm	10.1	23.3
	0,053 mm	8.8	19.1
	0,038 mm	7.5	15.6
kWh/t Gerada	< 0,212 mm	11.3	12.3
	< 0,150 mm	12.9	13.2
	< 0,106 mm	14.6	15.7
	< 0,074 mm	16.7	19.3
	< 0,053 mm	19.1	23.6
	< 0,038 mm	22.3	28.8

Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

No que se refere aos ciclones a pressão de operação registrada foi 55 kPa, com partição de água para o *underflow* de 16,8%. Um resumo das variáveis para análise de desempenho da classificação está listado na Tabela 5.

Tabela 5 – Desempenho da Classificação

Variáveis		Classificação
Número de Ciclones em Operação		4
Pressão de Operação	kPa	55
	psi	8.0
By-pass de água para o U/F (%)		16.8
Nitidez de separação - α		1.90
P ₈₀ do O/F (mm)		0.127
d _{50c} (mm)		0.120

Fonte: HDA Serviços S/S Ltda., 2015

5 RESULTADOS

As simulações do circuito de moagem derivadas do Caso Base foram realizadas em duas etapas, ambas utilizando-se o simulador *JKSimMet*.

A primeira etapa consistiu em simulações de variáveis individuais, de forma a estabelecer relações de causa e efeito entre elas e as alterações obtidas. Após cada simulação, acima descrita foi realizada uma segunda simulação, denominada Ajuste, de forma a que a operação do circuito se ajustasse às seguintes condições:

- P_{80} do produto (*overflow* dos ciclones); $0,127 \pm 0,010$ mm;
- Pressão de Operação dos ciclones: de 50 a 150 kPa;
- Carga circulante: de 150% a 300% e
- Operação dos ciclones fora da condição de descarga em cordão.

Todas as simulações acima descritas estão contidas nas seções 5.1 e 5.2. A última etapa, descrita na seção 5.3, consistiu em combinar mais de uma variável visando cenários pré-estipulados de aumento de vazão de alimentação do circuito.

5.1. ALTERAÇÕES NA CLASSIFICAÇÃO

Alterações na etapa de classificação são, em geral, menos custosas do que as feitas na etapa de moagem, tanto pelo fato do tempo de parada do sistema para realizar modificações ser menor, quanto pelo custo mais baixo para troca ou adição de ciclones e suas peças.

Em cada uma das seções que se seguem foram alteradas as seguintes variáveis individuais: a concentração de sólidos na alimentação do ciclone, a pressão em que os ciclones trabalham (no caso, foi analisado a partir da abertura e fechamento de ciclones em operação), o diâmetro do *apex* e o diâmetro do *vortex*.

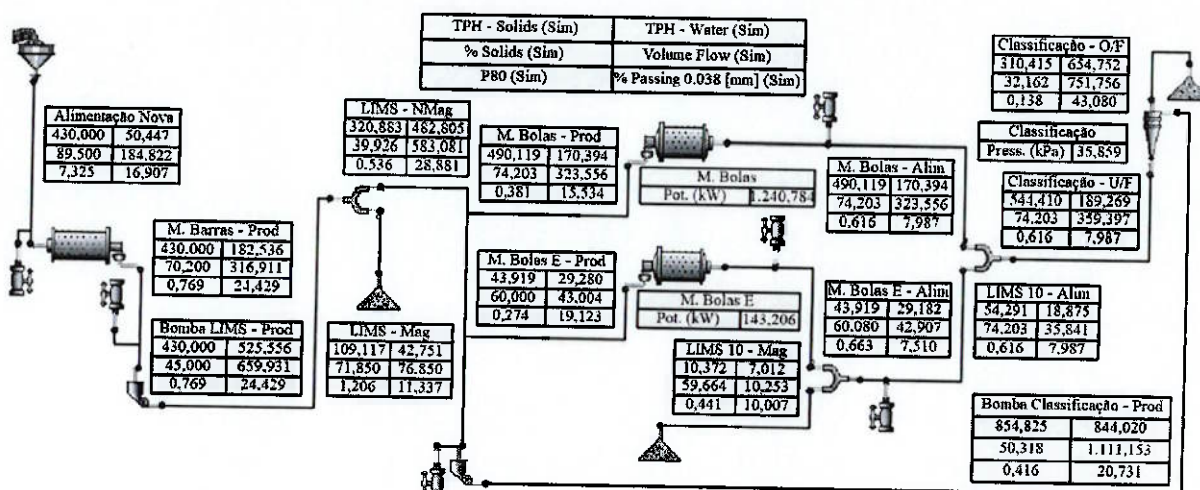
5.1.1. Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone

Mudando a concentração de sólidos no ciclone, muda-se a forma de interação entre as partículas, com a água e com o equipamento, em razão da mobilidade das partículas.

5.1.1.1. Aumento da Concentração de Sólidos – Simulação A

A maior concentração de sólidos no mesmo volume, resulta em comportamento de manada das partículas, fazendo com que finos e grossos se misturem, com o produto do *overflow* mais grosso, uma vez que as partículas menores não conseguem se separar das maiores. A Figura 4 representa o fluxograma de processo da Simulação A com 50% de sólidos na alimentação da bateria de ciclones, enquanto o Caso Base apresentava 47% de sólidos.

Figura 4 – Fluxograma do Processo – Simulação A



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 6 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação A. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 6 – Comparação Caso Base e Simulação A

Variável	Caso Base	Simulação A
Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	50
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,138
Carga Circulante (%)	218	175
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	36
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,6
Eficiência na Moagem (%)	133	124
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

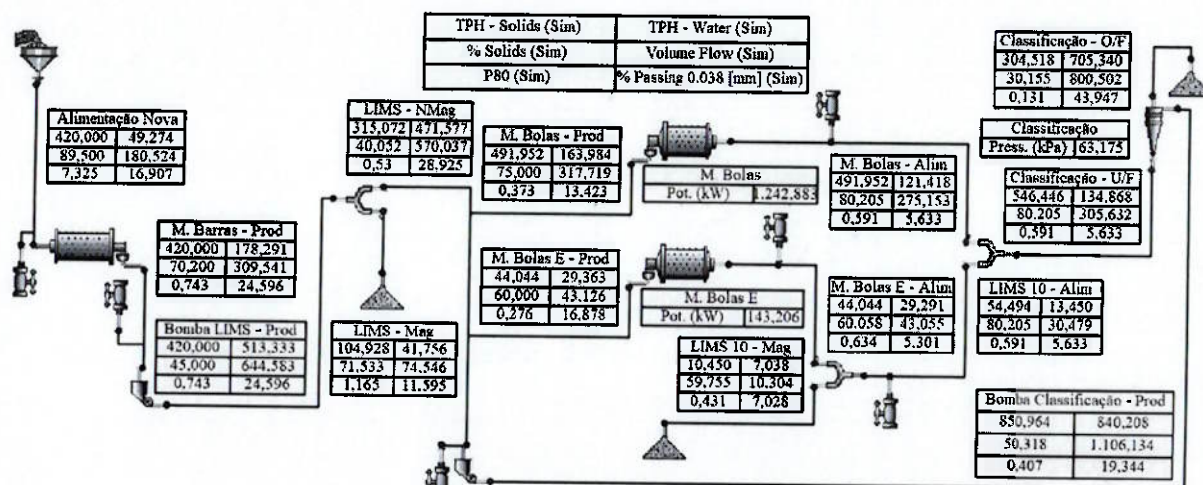
Fonte: Autoria Própria

O aumento da concentração de sólidos ocasionou o aumento do P₈₀ do *overflow* do ciclone, uma vez que com uma menor pressão operacional, a força centrífuga que atua nas partículas é reduzida, diminuindo a velocidade de sedimentação das partículas grossas, que acabam arrastadas pela água para o *overflow*. A pressão no ciclone cai para 36 kPa.

5.1.1.2. Ajuste da Simulação A

Após a realização da simulação A foi necessário retirar um ciclone da bateria para o retorno das condições de contorno, a fim de aumentar a pressão de operação no circuito. Na sequência foi necessário reduzir a vazão de sólidos de alimentação nova do circuito para 420 t/h para evitar o aumento excessivo da carga circulante. O fluxograma obtido nesta nova simulação está mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação A



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 7 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em **negrito**, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 7 - Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação A

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação A
Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	50
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	420
P ₈₀ (mm)	0,127	0,131
Carga Circulante (%)	218	179
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	63
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,3
Eficiência na Moagem (%)	133	127
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

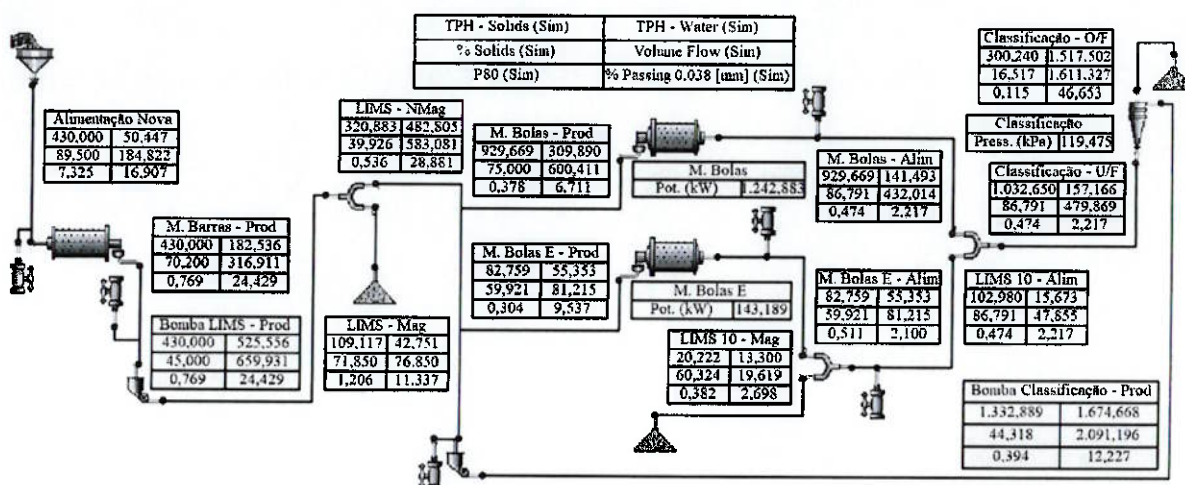
Fonte: Autoria Própria

As mudanças realizadas para a correção das condições de contorno deixaram a moagem menos eficiente. Contudo, apesar da vazão de alimentação ter sido diminuída, o P₈₀ foi mais fino do que o da simulação A, mas ainda mais grosso que do Caso Base.

5.1.1.3. Diminuição da Concentração de Sólidos – Simulação B

A diminuição da concentração de sólidos faz com que haja maior diluição na alimentação do ciclone e com isto, maior mobilidade, resultando em separações mais nítidas. Na simulação B a alimentação dos ciclones foi alterada para 44% ante 47% do Caso Base. A Figura 6 representa o fluxograma de processo da simulação B.

Figura 6 - Fluxograma do Processo – Simulação B



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 8 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação B. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 8 - Comparação Caso Base e Simulação B

Variável	Caso Base	Simulação B
Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	44
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,115
Carga Circulante (%)	218	344
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	119
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,2
Eficiência na Moagem (%)	133	142
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Sim

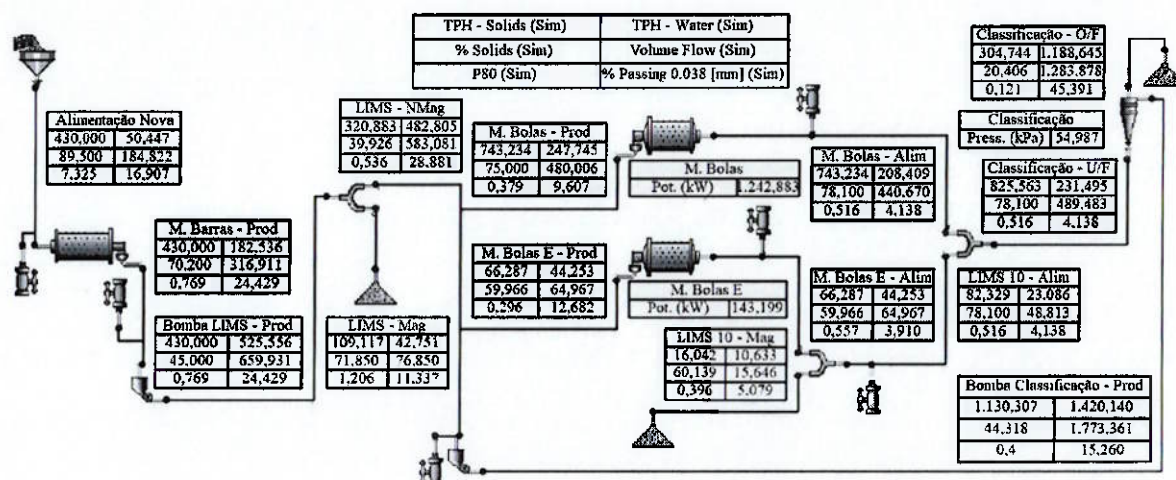
Fonte: Autoria Própria

É notável a diminuição do P₈₀, mas deve-se atentar ao aumento considerável da carga circulante, neste caso para 344% e a descarga do *underflow* ocorrer em cordão.

5.1.1.4. Ajuste da Simulação B

Para correção do regime de descarga do *underflow* dos ciclones acrescentou-se um ciclone à série em operação. A medida foi eficiente e, apesar de formar o P₈₀ do produto mais grosso em relação à Simulação B, resultou no reestabelecimento das condições de contorno estipuladas. A Figura 7 mostra o fluxograma da simulação de ajuste da simulação B.

Figura 7 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação B



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 9 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 9 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação B

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação B
Concentração de Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	44
Número de Ciclones em Operação	4	5
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,121
Carga Circulante (%)	218	271
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	55
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,6
Eficiência na Moagem (%)	133	137
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

Neste caso é possível observar que o P_{80} resultou significativamente mais fino como efeito das alterações da simulação realizada.

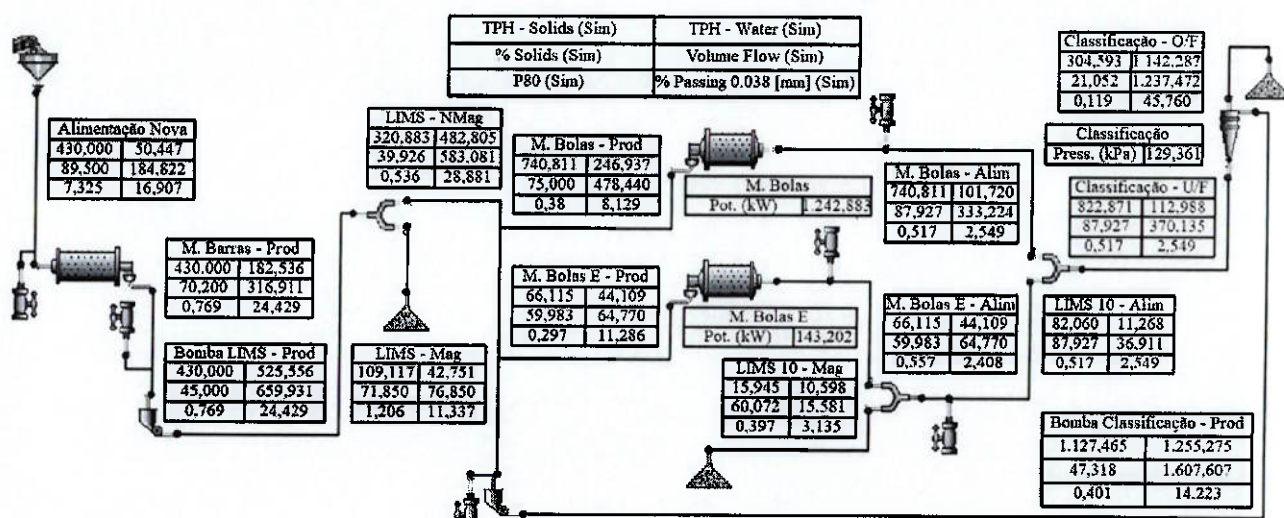
5.1.2. Pressão de Operação do Ciclone

A pressão do ciclone altera a componente radial que atua nas partículas para a separação dos finos e grossos. É possível alterar esta variável de diversas maneiras, controlando a quantidade de água que entra no ciclone, com alteração do tamanho do *apex*, entre outros. Para analisar estes efeitos, a variável utilizada foi a alteração no número de ciclones em operação.

5.1.2.1. Três Ciclones em Operação – Simulação C

Para aumentar a pressão, a Simulação C teve por base a operação de um ciclone a menos na bateria em relação ao Caso Base. Com o aumento da pressão, a componente radial de força cria um produto mais fino, uma vez que as partículas mais grossas são empurradas com maior intensidade na direção das paredes. A Figura 8 mostra o fluxograma de processo simulado. O Caso Base atua com 4 ciclones, enquanto a simulação C com apenas 3 resultando em aumento de pressão de 55 kPa para 129 kPa.

Figura 8 – Fluxograma do Processo – Simulação C



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 10 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação C. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 10 – Comparação Caso Base e Simulação C

Variável	Caso Base	Simulação C
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,119
Carga Circulante (%)	218	270
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	129
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,4
Eficiência na Moagem (%)	133	139
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Sim

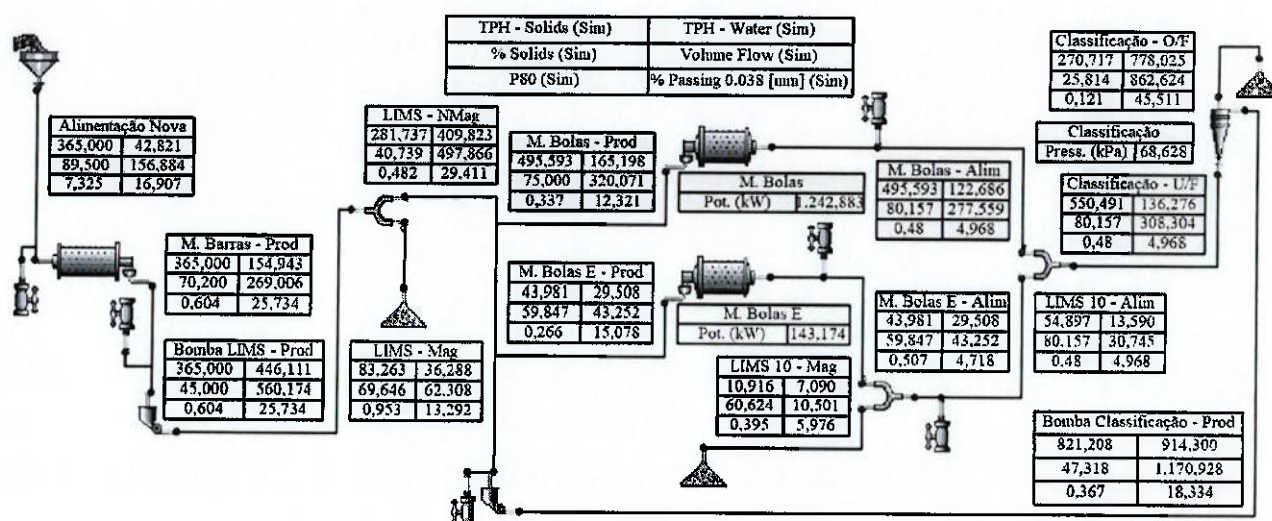
Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar uma diminuição no P₈₀, novamente com um aumento considerável da carga circulante do sistema. No entanto, o maior problema é a descarga do *underflow* em cordão.

5.1.2.2. Ajuste da Simulação C

Para evitar a formação de cordão, sem alterar as demais variáveis optou-se pela diminuição da vazão nova de alimentação do circuito. A Figura 9 mostra o fluxograma da simulação de ajuste realizada.

Figura 9 - Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação C



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 11 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 11 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação C

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação C
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	365
P_{80} (mm)	0,127	0,121
Carga Circulante (%)	218	203
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	69
WI Operacional (kWh/t)	9,9	11,3
Eficiência na Moagem (%)	133	116
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

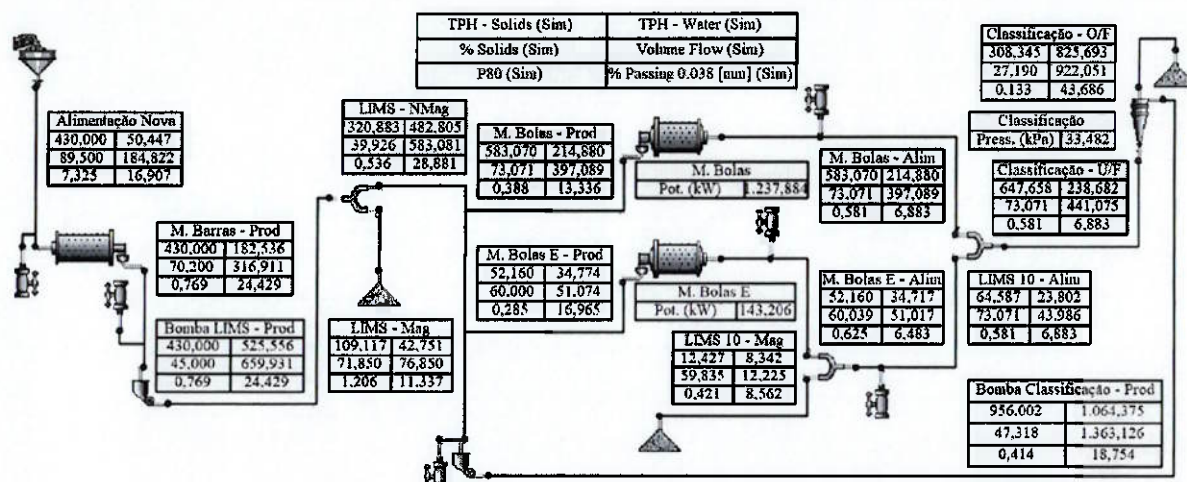
Fonte: Autoria Própria

Mesmo com uma diminuição considerável na alimentação, o corte se manteve abaixo do que o obtido no Caso Base.

5.1.2.3. Cinco Ciclones em Operação – Simulação D

A Simulação D consistiu na alteração para 5 ciclones em operação, portanto uma unidade adicional em relação ao Caso Base. O resultado foi a queda na pressão de operação de 55 kPa para 33 kPa. A Figura 10 mostra o fluxograma de processo da simulação D.

Figura 10 – Fluxograma do Processo – Simulação D



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 12 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação D. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 12 – Comparação Caso Base e Simulação D

Variável	Caso Base	Simulação D
Número de Ciclones em Operação	4	5
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,133
Carga Circulante (%)	218	210
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	33
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,3
Eficiência na Moagem (%)	133	128
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

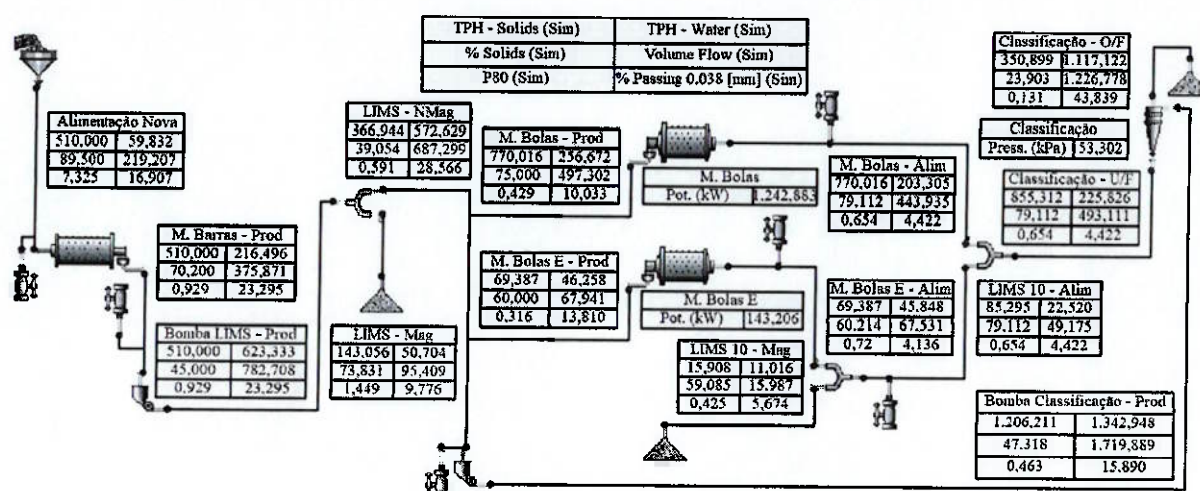
Fonte: Autoria Própria

É possível notar que o P₈₀ da simulação D aumentou, mas isto também faz com que a carga circulante seja reduzida, oportunidade assim para aumento da vazão de alimentação nova.

5.1.2.4. Ajuste da Simulação D

Para recuperar a pressão obtida na simulação D optou-se pelo aumento progressivo da vazão de alimentação do circuito, até a pressão se estabilizar em uma faixa de operação aceitável. O resultado foi o aumento da vazão para 510 t/h com correspondente diminuição do P_{80} . Apesar de aumentar a carga circulante, esta se manteve dentro das condições de contorno estabelecidas. A Figura 11 representa o fluxograma de processo desta simulação.

Figura 11 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação D



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 13 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em **negrito**, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 13 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação D

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação D
Número de Ciclones em Operação	4	5
Vazão de Alimentação (t/h)	430	510
P ₈₀ (mm)	0,127	0,131
Carga Circulante (%)	218	244
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	53
WI Operacional (kWh/t)	9,9	8,6
Eficiência na Moagem (%)	133	153
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

Apesar do aumento da carga circulante a eficiência do ajuste aumentou de modo significativo.

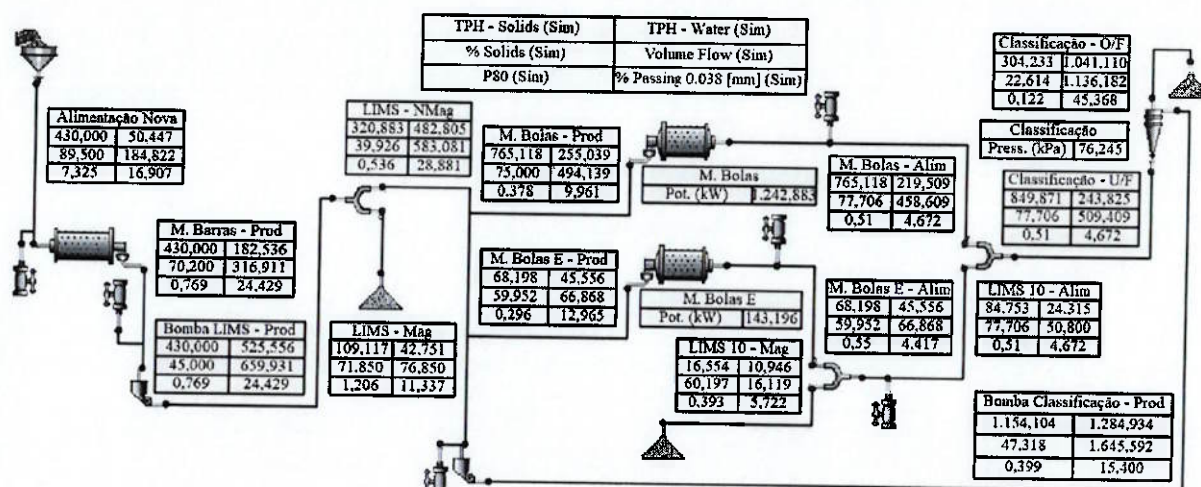
5.1.3. Diâmetro do Apex

A alteração do diâmetro do *apex*, além de alterar a pressão de alimentação do ciclone afeta também o adensamento do *underflow*.

5.1.3.1. Aumento do Diâmetro do Apex – Simulação E

A simulação de aumento do diâmetro do *apex* de 122 mm (5") para 140 mm (5,5") resultou na diminuição do P₈₀ do produto do circuito, uma vez que uma maior quantidade de partículas mais grosseiras é encaminhada para o *underflow*, resultando em uma classificação mais fina. A Figura 12 mostra o fluxograma de processo da Simulação E.

Figura 12 – Fluxograma do Processo – Simulação E



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 14 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação E. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em **negrito**, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 14 - Comparação Caso Base e Simulação E

Variável	Caso Base	Simulação E
Diâmetro do Apex (mm)	122	140
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,122
Carga Circulante (%)	218	279
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	76
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,6
Eficiência na Moagem (%)	133	137
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

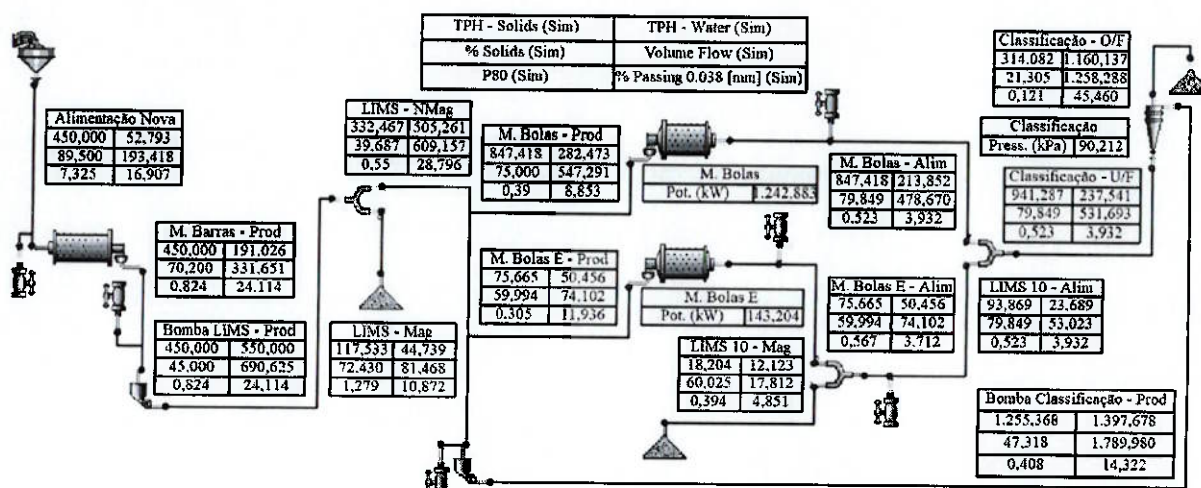
Fonte: Autoria Própria

A Tabela 14 indica a diminuição do P₈₀ e o aumento da carga circulante, assim como aumento na pressão de operação do ciclone, mantendo-se as condições de operação dentro das faixas estipuladas.

5.1.3.2. Ajuste da Simulação E

Como a Simulação E não apresentou qualquer infração nas condições de contorno, decidiu-se aumentar progressivamente a vazão de alimentação no circuito, até o máximo valor possível. Notou-se que a partir de 450 t/h, a carga circulante ultrapassava o valor estipulado. O fluxograma desta simulação é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação E



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 15 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 15 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação E

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação E
Diâmetro do Apex (mm)	122	140
Vazão de Alimentação (t/h)	430	450
P ₈₀ (mm)	0,127	0,121
Carga Circulante (%)	218	300
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	90
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,2
Eficiência na Moagem (%)	133	143
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

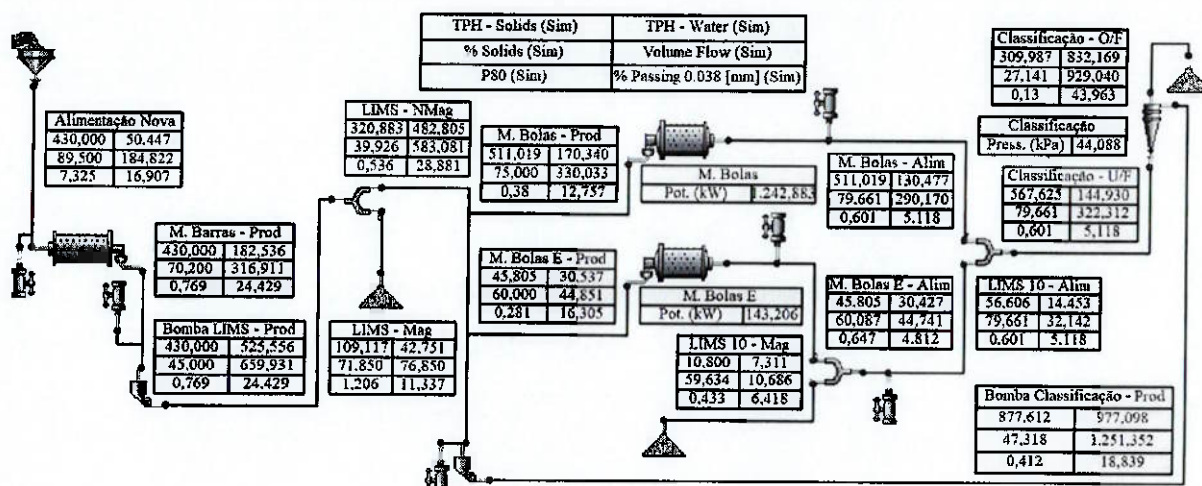
Fonte: Autoria Própria

É possível perceber que a carga circulante foi ao limite máximo estabelecido, portanto não seria ideal manter a produção nestas condições, pois uma pequena mudança na vazão de alimentação ou nas características dos sólidos poderia causar instabilidades à operação do circuito.

5.1.3.3. Diminuição do Diâmetro do Apex – Simulação F

A diminuição do diâmetro do apex de 127 mm (5") para 114 mm (4,5") resultou na queda de pressão do circuito e em um produto mais grosseiro. Apex muito pequeno pode acarretar um acúmulo de material grosseiro, que acaba sendo descarregado pelo *overflow*, o que por sua vez pode prejudicar a eficiência da classificação. A Figura 14 mostra o fluxograma da simulação F.

Figura 14 – Fluxograma do Processo – Simulação F



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 16 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação A. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 16 – Comparação Caso Base e Simulação F

Variável	Caso Base	Simulação F
Diâmetro do Apex (mm)	127	114
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,130
Carga Circulante (%)	218	183
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	44
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,1
Eficiência na Moagem (%)	133	130
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

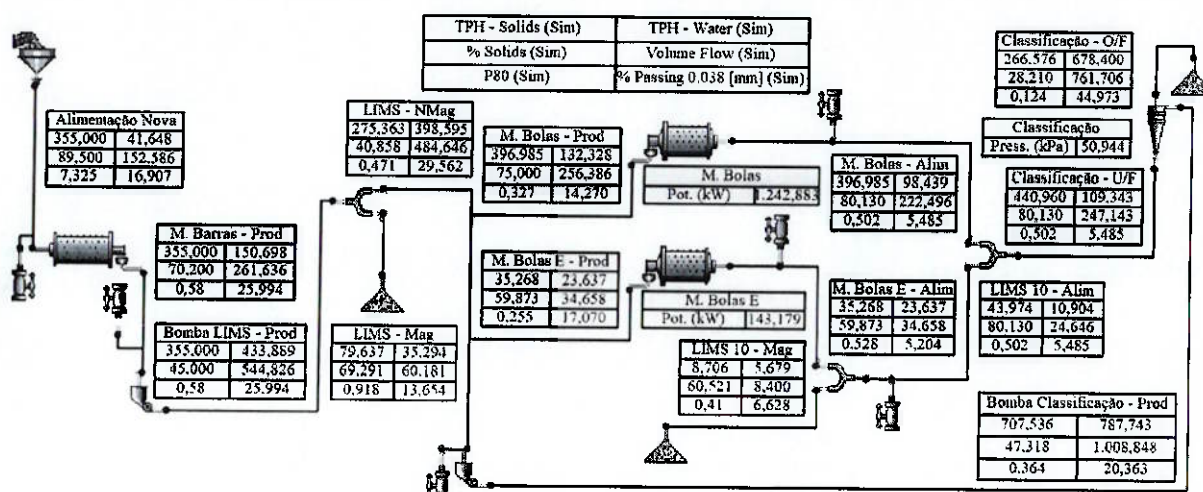
Fonte: Autoria Própria

O aumento do corte, juntamente com a diminuição da carga circulante foram acompanhados pela diminuição excessiva de pressão de operação do ciclone, fora da faixa estipulada de condição de operação.

5.1.3.4. Ajuste da Simulação F

O Ajuste para a diminuição do diâmetro do Apex envolve uma diminuição do número de ciclones para aumentar a pressão do sistema, porém apenas essa modificação faz com que o padrão de descarga do *underflow* seja em cordão. Para corrigir esse novo problema é necessário diminuir a taxa de alimentação do sistema. A Figura 15 mostra o fluxograma do ajuste da simulação F.

Figura 15 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação F



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 17 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 17 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação F

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação F
Diâmetro do Apex (mm)	127	114
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	355
P ₈₀ (mm)	0,127	0,124
Carga Circulante (%)	218	165
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	51
WI Operacional (kWh/t)	9,9	11,9
Eficiência na Moagem (%)	133	110
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

É possível observar que, apesar de todas as condições de contorno serem respeitadas, a vazão de alimentação e a eficiência da moagem diminuíram, respectivamente de 430 t/h para 355 t/h e de 133% para 110%.

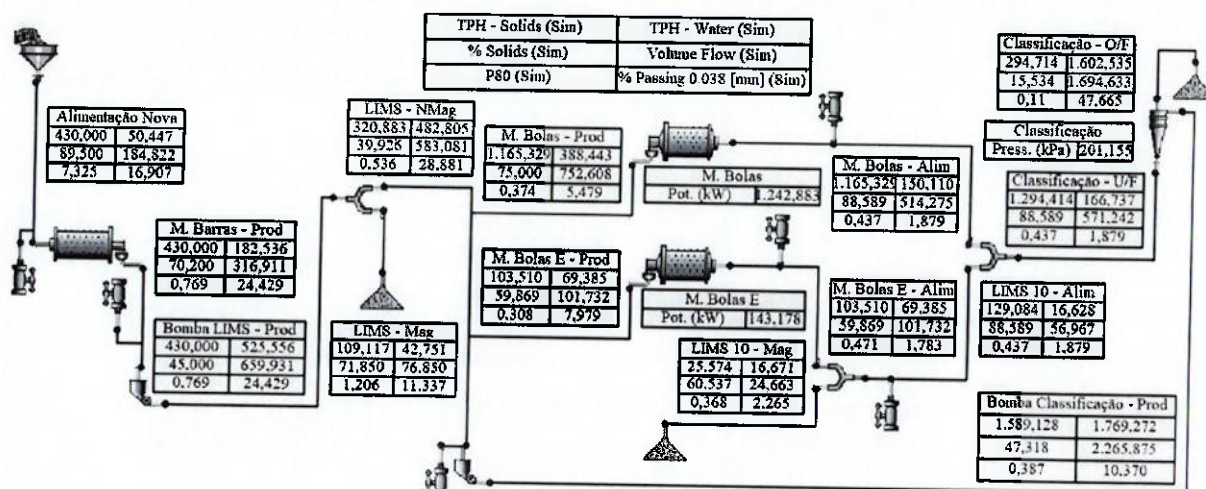
5.1.4. Diâmetro do Vortex

A mudança do diâmetro do vortex causa mudanças na pressão de operação, consequentemente interfere na dinâmica de movimentação das partículas, tamanho de separação e na capacidade do ciclone. Um vortex de diâmetro maior, por exemplo, provoca aumento no diâmetro do tamanho de separação de classificação e na concentração de sólidos no *overflow*.

5.1.4.1. Diminuição do Diâmetro do Vortex – Simulação G

A diminuição do diâmetro do vortex de 254 mm (10") para 203 mm (8") do Caso Base resultou em granulometria mais fina do *overflow*, além de uma carga circulante maior. A Figura 16 representa o fluxograma de processo da simulação G.

Figura 16 – Fluxograma do Processo – Simulação G



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 18 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação G. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em **negrito**, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 18 – Comparação Caso Base e Simulação G

Variável	Caso Base	Simulação G
Diâmetro do Vortex (mm)	254	203
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,110
Carga Circulante (%)	218	439
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	201
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,1
Eficiência na Moagem (%)	133	145
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Sim

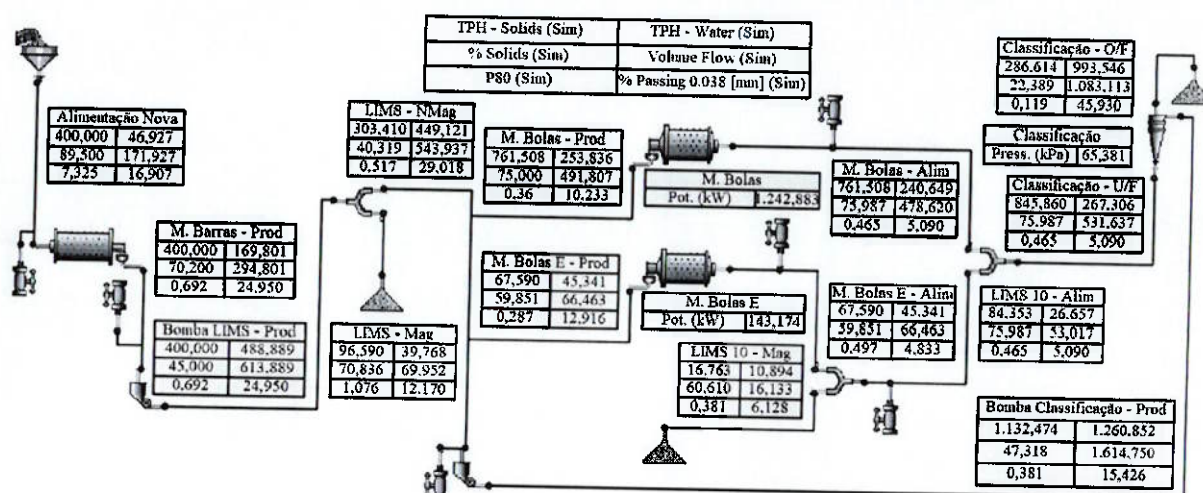
Fonte: Autoria Própria

É notável a diminuição de P₈₀. Nota-se também um aumento considerável da carga circulante do circuito, em conjunto com aumento de pressão de operação dos ciclones para 201 kPa, além de descarga em cordão.

5.1.4.2. Ajuste da Simulação G

Todas as condições de contorno da simulação G foram infringidas. Para tentar contornar a situação procurou-se, primeiramente, corrigir a pressão mediante a inclusão de um ciclone na operação. O resultado foi que, apesar de cessar a operação em cordão e ajustar a pressão, a carga circulante continuou acima de 300%. Para corrigir, a vazão de alimentação nova foi diminuída. A Figura 17 mostra o fluxograma de processo da simulação de ajuste da Simulação G.

Figura 17 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação G



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 19 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 19 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação G

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação G
Diâmetro do Vortex (mm)	254	203
Número de Ciclones em Operação	4	5
Vazão de Alimentação (t/h)	430	400
P ₈₀ (mm)	0,127	0,119
Carga Circulante (%)	218	295
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	65
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,1
Eficiência na Moagem (%)	133	130
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

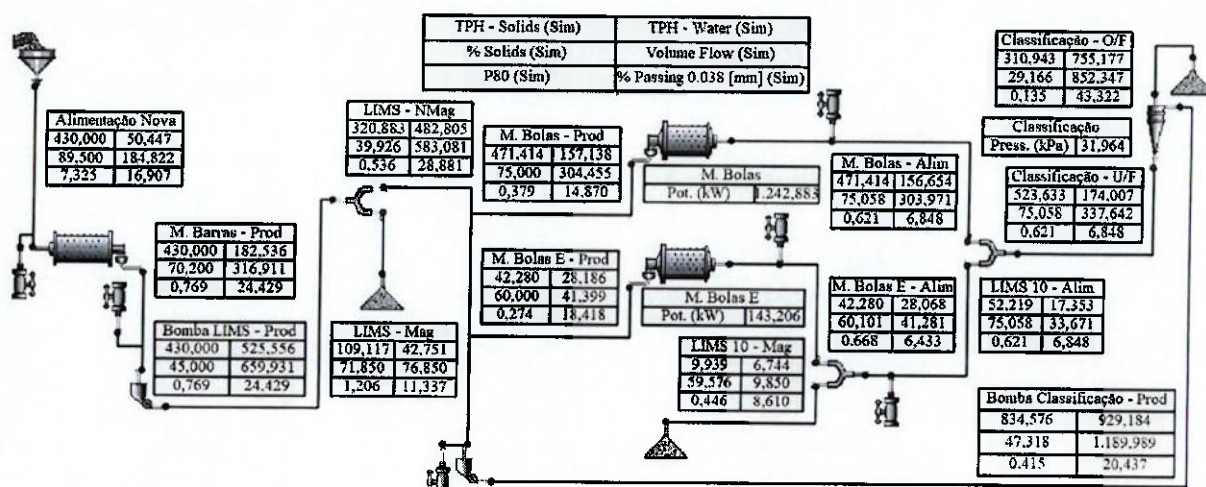
Fonte: Autoria Própria

Além da redução da vazão de sólidos de alimentação nova, de 430 t/h para 400 t/h, o tamanho de separação foi reduzido de 0,127 mm para 0,119 mm, com aumento da carga circulante de 218% para 295%.

5.1.4.3. Aumento do Diâmetro do Vortex

A Simulação H refere-se ao aumento do diâmetro do vortex dos ciclones de 254 mm (10") para 305 mm (12"). A Figura 18 representa o fluxograma de processo da simulação H.

Figura 18 – Fluxograma do Processo – Simulação H



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 20 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação H. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 20 – Comparação Caso Base e Simulação H

Variável	Caso Base	Simulação H
Diâmetro do Vortex (mm)	254	305
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,135
Carga Circulante (%)	218	168
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	32
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,4
Eficiência na Moagem (%)	133	126
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

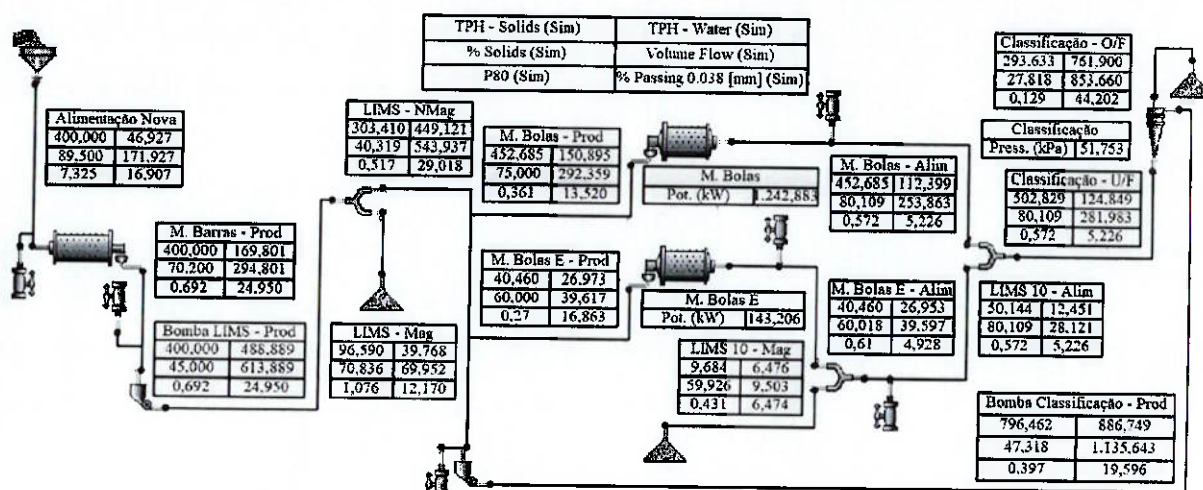
Fonte: Autoria Própria

Observa-se a diminuição considerável da carga circulante de 218% para 168%, em conjunto com um aumento do P₈₀ do produto de 0,127 mm para 0,135 mm. A Simulação H resultou em uma pressão de operação do ciclone de apenas 32 kPa.

5.1.4.4. Ajuste da Simulação H

O ajuste da pressão de operação do circuito foi obtido mediante a diminuição do número de ciclones em operação. Neste caso, porém, os ciclones passaram a operar com descarga em cordão, efeito este corrigido com a diminuição da vazão de alimentação nova do circuito. A Figura 19 mostra o fluxograma de processo correspondente à Simulação H.

Figura 19 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação H



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 21 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 21 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação H

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação H
Diâmetro do Vortex (mm)	254	305
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	400
P ₈₀ (mm)	0,127	0,129
Carga Circulante (%)	218	171
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	52
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,7
Eficiência na Moagem (%)	133	122
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

O ajuste realizado na simulação resultou em uma carga circulante menor, de 218% para 171%, mas aumentou o P₈₀ de 0,127 mm para 0,129 mm, além de ter sido necessária a diminuição de 430 t/h de alimentação nova no circuito, para 400 t/h.

5.2. ALTERAÇÕES NOS MOINHOS DE BOLAS

Alterações no moinho são mais custosas, não só pelo preço dos equipamentos, mas em tempo de parada do sistema. Em moinhos de bolas, as alterações englobam concentração de sólidos na alimentação do moinho, grau de enchimento, velocidade de rotação e tamanho de bolas de reposição.

O circuito analisado apresentava dois moinhos de bolas operando em paralelo, sendo um dez vezes menor que o outro, recebendo o produto não magnético da separação magnética. As simulações descritas a seguir tiveram por base o moinho menor.

5.2.1. Concentração de Sólidos de Polpa de Alimentação do Moinho

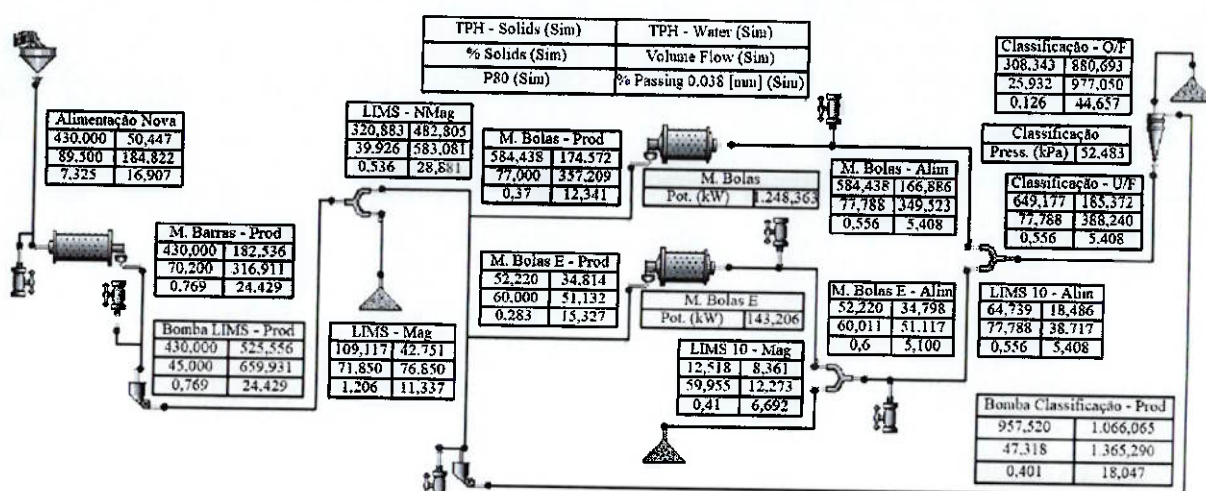
Alterações na concentração de sólidos altera o tempo de residência das partículas na câmara do moinho e, portanto, a chance de uma partícula ser fragmentada. As

simulações desta seção foram conduzidas exclusivamente no moinho de bolas principal, uma vez que este processa a maior parte do material.

5.2.1.1. Aumento na Concentração de Sólidos – Simulação I

O aumento de 75% para 77% na concentração de sólidos na alimentação do moinho de bolas aumenta o tempo de residência das partículas, aumentando a probabilidade de quebra das partículas. A Figura 20 apresenta o fluxograma de processo correspondente à simulação aqui descrita, Simulação I.

Figura 20 – Fluxograma do Processo – Simulação I



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 22 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação I. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 22 – Comparação Caso Base e Simulação I

Variável	Caso Base	Simulação I
Sólidos na Alimentação do Moinho (%)	75	77
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,126
Carga Circulante (%)	218	211
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	52
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,8
Eficiência na Moagem (%)	133	133
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

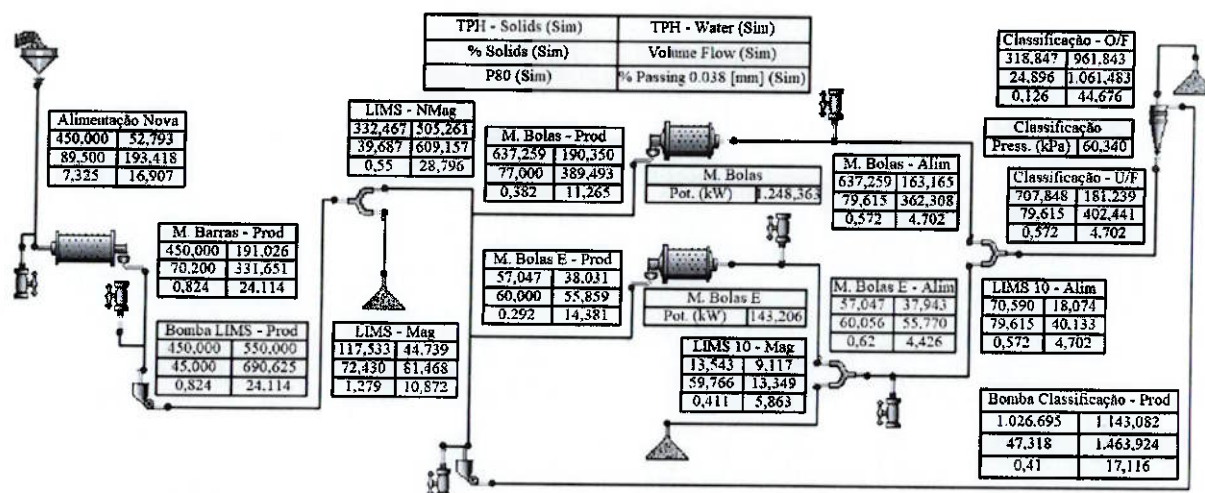
Fonte: Autoria Própria

As mudanças observadas na Simulação I são relativamente pequenas em relação ao Caso Base.

5.2.1.2. Ajuste da Simulação I

Como não houve violação em qualquer uma das condições de contorno estipuladas, a simulação de ajuste buscou aumentos na vazão de alimentação nova do circuito. A Figura 21 apresenta o fluxograma do processo desta simulação.

Figura 21 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação I



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 23 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 23 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação I

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação I
Sólidos na Alimentação do Moinho (%)	75	77
Vazão de Alimentação (t/h)	430	450
P ₈₀ (mm)	0,127	0,126
Carga Circulante (%)	218	222
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	60
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,4
Eficiência na Moagem (%)	133	140
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

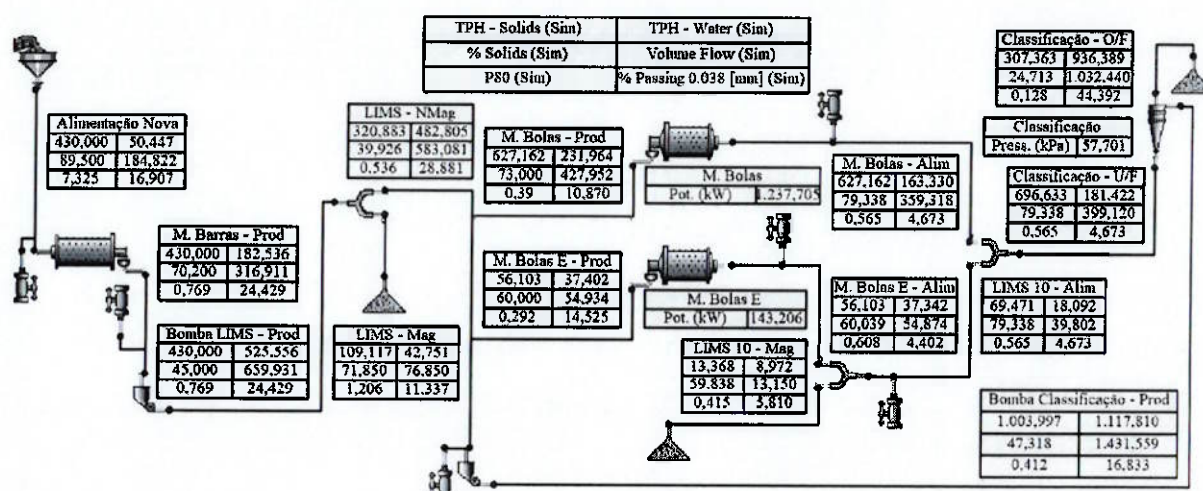
Fonte: Autoria Própria

Neste caso, a condição limitante passa a ser o efeito de descarga em cordão após a vazão de 450 t/h de sólidos.

5.2.1.3. Diminuição na Concentração de Sólidos – Simulação J

A Simulação J visou avaliar os efeitos da diminuição da concentração de sólidos de 75% para 73%. O fluxograma do processo obtido pela simulação está apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma do Processo – Simulação J



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 24 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação J. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 24 – Comparação Caso Base e Simulação J

Variável	Caso Base	Simulação J
Sólidos na Alimentação do Moinho (%)	75	73
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,128
Carga Circulante (%)	218	227
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	58
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,9
Eficiência na Moagem (%)	133	132
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

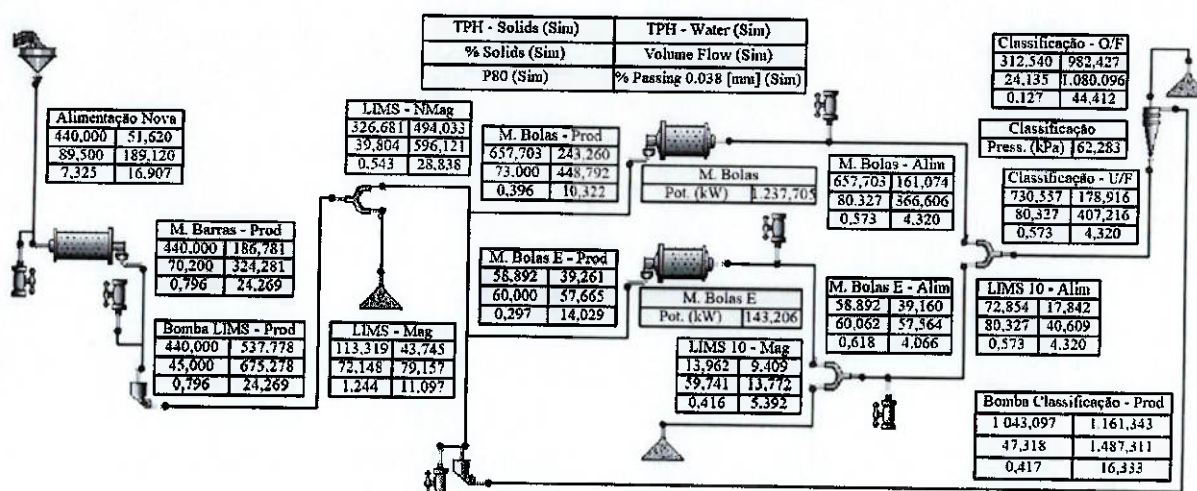
Fonte: Autoria Própria

É possível observar que as mudanças que ocorreram foram relativamente pequenas. O ciclone opera com pressão pouco maior, de 55 kPa para 58 kPa acompanhado de aumento do tamanho de separação, de 0,127 mm para 0,128 mm.

5.2.1.4. Ajuste da Simulação J

Como não houve violação das condições de contorno estipuladas, a simulação de ajuste buscou aumentar a vazão de alimentação nova do circuito. A Figura 23 apresenta o fluxograma de processo correspondente ao ajuste de Simulação J.

Figura 23 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação J



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 25 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 25 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação J

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação J
Sólidos na Alimentação do Moinho (%)	75	73
Vazão de Alimentação (t/h)	430	440
P ₈₀ (mm)	0,127	0,127
Carga Circulante (%)	218	234
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	62
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,7
Eficiência na Moagem (%)	133	135
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

A análise da Tabela 25 indica variações relativamente pequenas na operação do do circuito. Com o aumento da vazão de alimentação, houve aumento da carga circulante e da pressão de operação dos ciclones.

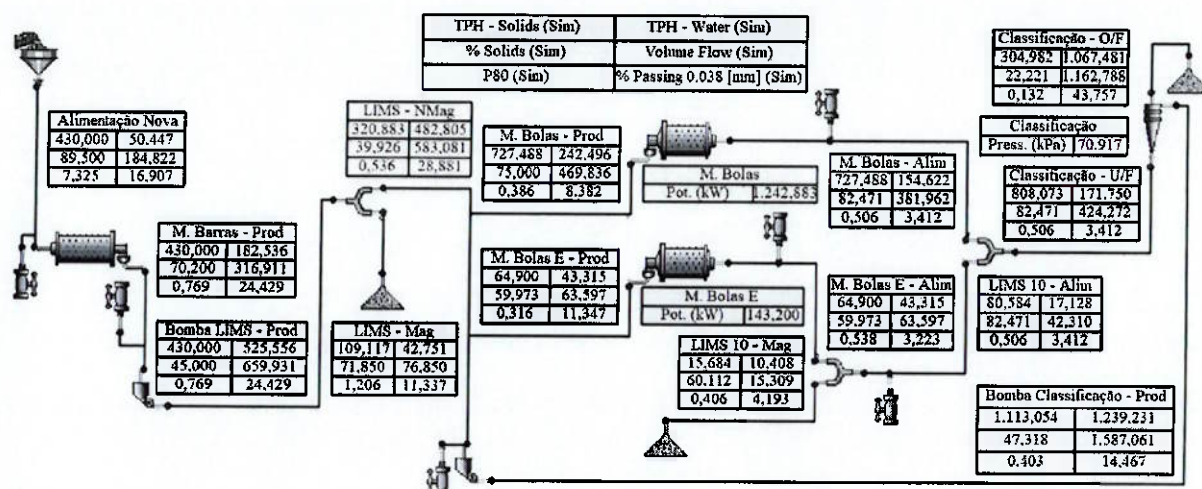
5.2.2. Tamanho de Bolas

O tamanho de bola influencia na frequência e intensidade de quebra das partículas que ocorrerá na câmara de moagem, uma vez que a quebra depende da relação entre área de superfície dos corpos moedores e respectivas massas.

5.2.2.1. Aumento do Tamanho de Bola

O aumento do tamanho máximo de bolas de 40 mm para 50 mm nos dois moinhos em operação faz com que a relação de superfície por volume de corpos moedores caia, o que prejudica a moagem por superfície e melhora a quebra por impacto, tornando uma moagem de grossos mais eficiente, na Simulação K, porém, esta mudança faz com que o P₈₀ aumente, como visto na Figura 24, muito possivelmente mostrando que o moinho apresenta já um grande volume de finos.

Figura 24 – Fluxograma do Processo – Simulação K



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 26 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação K. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 26 – Comparação Caso Base e Simulação K

Variável	Caso Base	Simulação K
Tamanho Máximo de Bolas (mm)	40	50
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,132
Carga Circulante (%)	218	265
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	71
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,4
Eficiência na Moagem (%)	133	126
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Sim

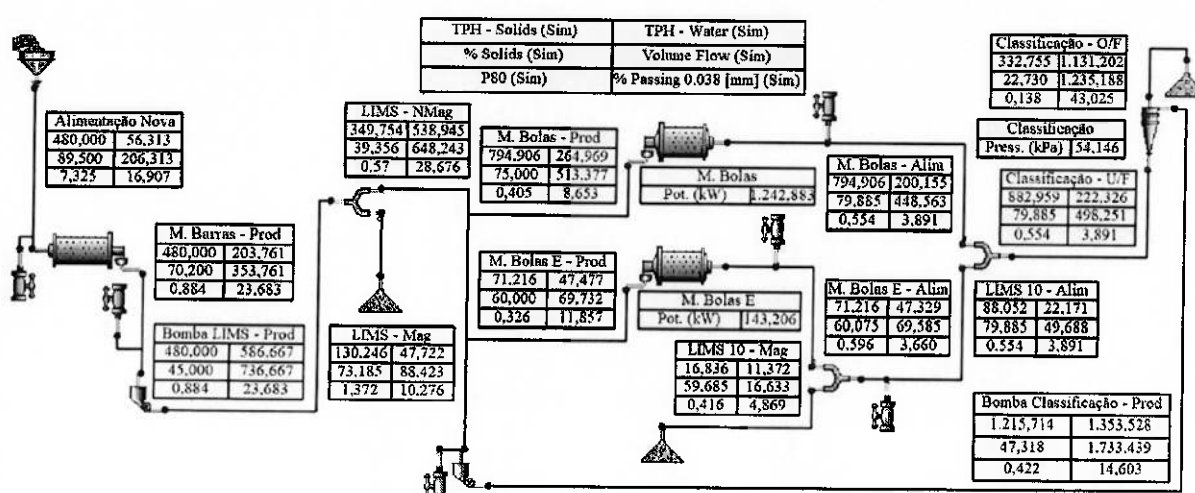
Fonte: Autoria Própria

Conforme mostra a Tabela 26, houve aumento da carga circulante e o P₈₀ do produto tornou-se mais grosseiro, além de do aumento da pressão de operação dos ciclones.

5.2.2.2. Ajuste da Simulação K

O ajuste da Simulação K foi conduzida mediante à inclusão de mais um ciclone em operação, para evitar a operação em cordão. Contudo, isso causou uma diminuição na pressão do sistema e para o ajuste, aumentou-se a vazão nova de alimentação de 430 t/h para 480 t/h, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação K



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 27 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 27 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação K

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação K
Tamanho Máximo de Bolas (mm)	40	50
Número de Ciclones em Operação	4	5
Vazão de Alimentação (t/h)	430	480
P ₈₀ (mm)	0,127	0,138
Carga Circulante (%)	218	265
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	54
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,6
Eficiência na Moagem (%)	133	136
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

O aumento significativo da vazão de alimentação do circuito foi acompanhado de um produto final mais grosseiro de 0,127 mm para 0,138 mm, tendo por base as modificações do tamanho de bolas e o aumento do número de ciclones em operação.

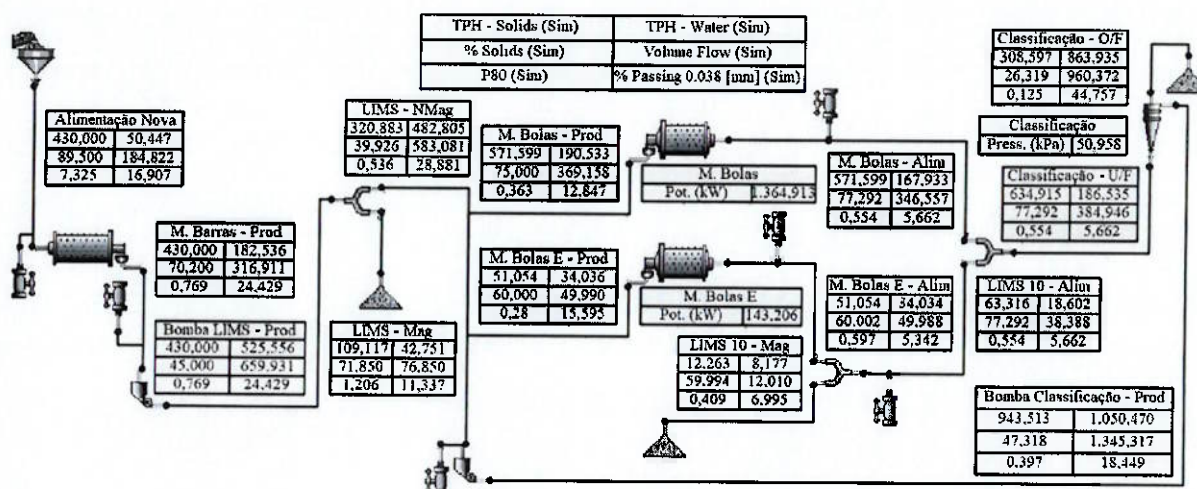
5.2.3. Grau de Enchimento no Moinho

Alterações no grau de enchimento alteram a potência de operação do moinho e, portanto, a quantidade de energia disponível para a quebra de partículas. Neste caso, somente foi alterado o grau de enchimento do moinho de bolas principal.

5.2.3.1. Aumento do Grau de Enchimento – Simulação L

Na Simulação L, o aumento do grau de enchimento do moinho de bolas foi de 28% para 33%. A Figura 26 apresenta o fluxograma de processo obtido a partir da Simulação L.

Figura 26 – Fluxograma do Processo – Simulação L



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 28 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação L. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 28 – Comparação Caso Base e Simulação L

Variável	Caso Base	Simulação L
Grau de Enchimento (%)	28	33
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,125
Carga Circulante (%)	218	206
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	51
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,6
Eficiência na Moagem (%)	133	124
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

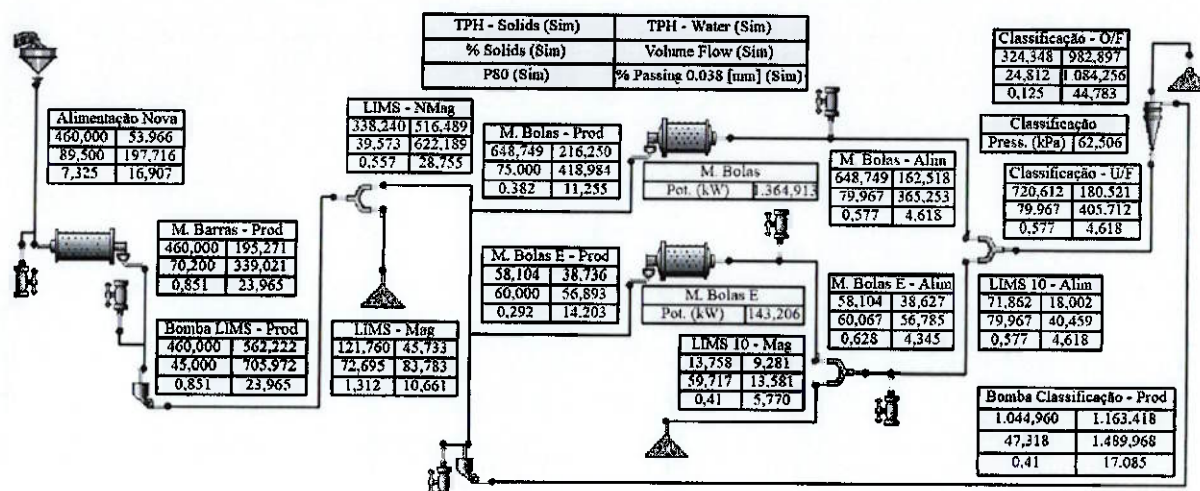
Fonte: Autoria Própria

Nota-se na Tabela 28 que o aumento do grau de enchimento de 28% para 33% resultou em diminuição da carga circulante e da pressão de operação dos ciclones, assim como o P₈₀ do produto mais fino, de 0,127 mm para 0,125 mm.

5.2.3.2. Ajuste da Simulação L

Como não houve violação das condições de contorno estipuladas, a simulação de ajuste buscou aumentar a vazão de alimentação nova do circuito. A Figura 27. apresenta o fluxograma de processo correspondente ao ajuste de Simulação L.

Figura 27 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação L



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 29 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 29 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação L

Variável	Caso Base	Ajuste da Simulação L
Grau de Enchimento (%)	28	33
Vazão de Alimentação (t/h)	430	460
P_{80} (mm)	0,127	0,125
Carga Circulante (%)	218	222
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	63
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,9
Eficiência na Moagem (%)	133	133
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

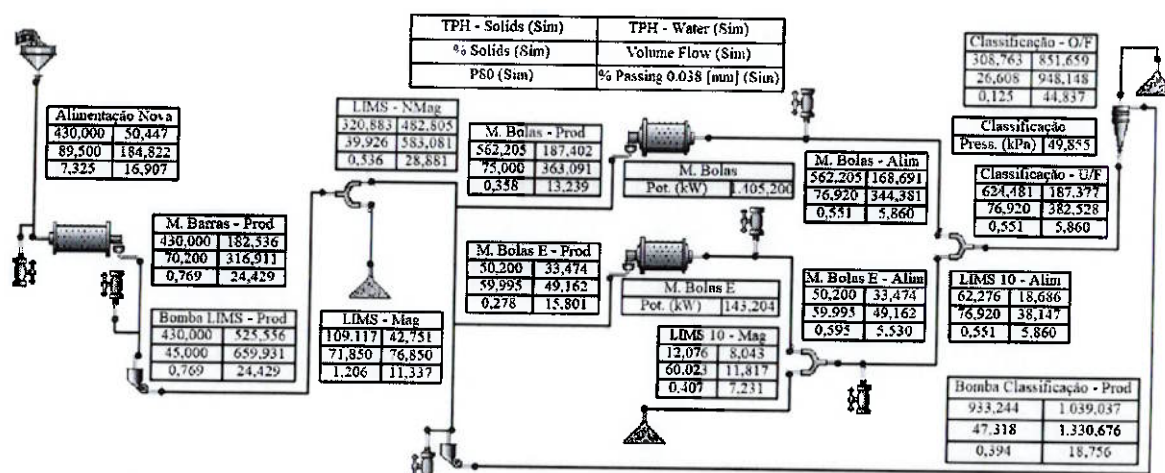
Fonte: Autoria Própria

A tabela mostra que é possível aumentar a vazão de alimentação de 430 t/h para 460 t/h com diminuição de P_{80} .

5.2.3.3. Aumento do Grau de Enchimento – Simulação M

Na Simulação M, o aumento do grau de enchimento do moinho de bolas foi de 28% para 35%. A Figura 28 apresenta o fluxograma de processo obtido a partir da Simulação M.

Figura 28 – Fluxograma do Processo – Simulação M



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 30 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação M. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 30 – Comparação Caso Base e Simulação M

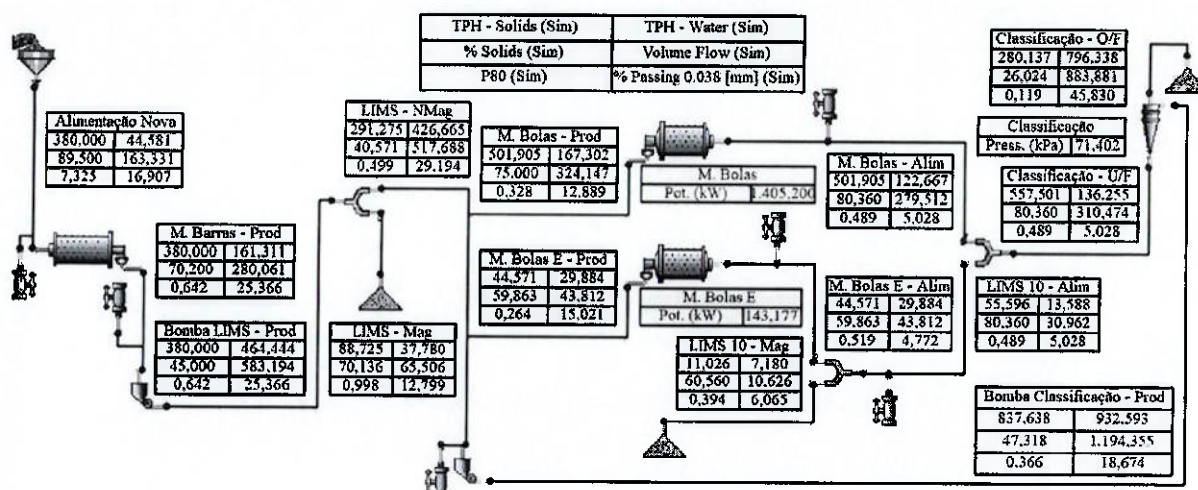
Variável	Caso Base	Simulação M
Grau de Enchimento (%)	28	35
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,125
Carga Circulante (%)	218	202
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	50
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,8
Eficiência na Moagem (%)	133	121
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

5.2.3.4. Ajuste da Simulação M

O ajuste da Simulação M foi conduzida mediante à retirada de um ciclone em operação, para aumento na pressão do sistema. Contudo, isso fez a operação entrar em cordão e para o ajuste, diminuiu-se a vazão nova de alimentação de 430 t/h para 380 t/h como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do Processo – Ajuste da Simulação M



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 31 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 31 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação M

Variáveis e Efeitos	Caso Base	Ajuste da Simulação M
Grau de Enchimento (%)	28	35
Número de Ciclones em Operação	4	3
Vazão de Alimentação (t/h)	430	380
P ₈₀ (mm)	0,127	0,119
Carga Circulante (%)	218	199
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	71
WI Operacional (kWh/t)	9,9	11,8
Eficiência na Moagem (%)	133	111
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

A diminuição do P₈₀ de 0,127 mm para 0,119 mm depende de uma diminuição da vazão de alimentação de 430 t/h para 380 t/h.

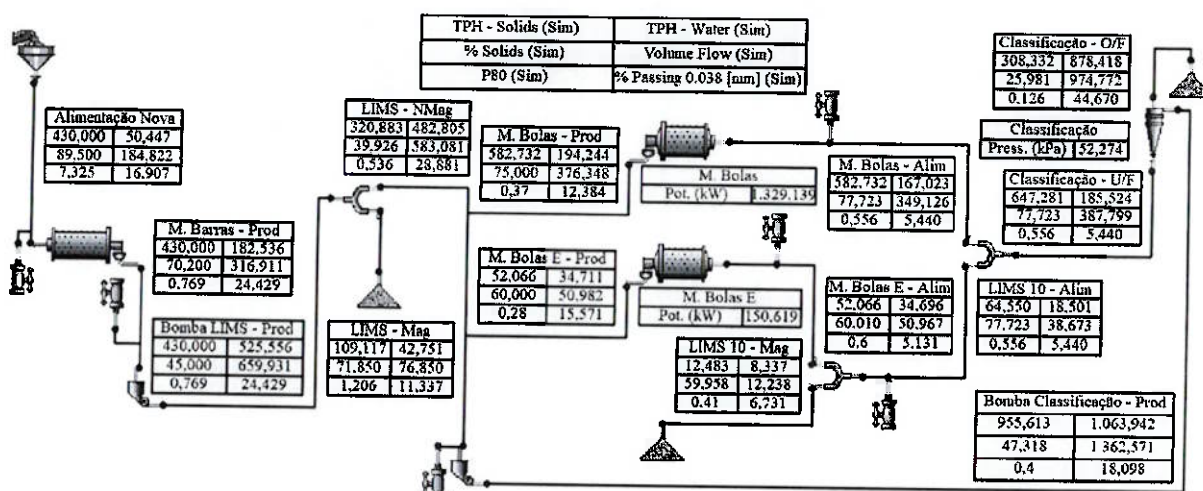
5.2.4. Velocidade Crítica

A velocidade de rotação do moinho comanda o tipo principal de quebra que ocorrerá dentro dele, uma baixa velocidade causa um efeito cascata no interior do moinho (onde o minério e os corpos moedores se chocam e friccionam um contra o outro), um aumento na velocidade causa um efeito de catarata (o que faz a queda do minério e dos corpos moedores participar do processo de quebra) e um aumento excessivo na velocidade pode causar centrifugação, onde a carga apenas acompanha o giro do moinho, sem ocorrer quebra.

5.2.4.1. Aumento na Velocidade Crítica – Simulação N

O Caso Base trabalha em 70% da velocidade crítica e a Simulação N trabalha em 74%. A Figura 30 mostra o fluxograma de processo da simulação.

Figura 30 – Fluxograma de Processo – Simulação N



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 32 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e à Simulação N. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 32 – Comparação Caso Base e Simulação N

Variável	Caso Base	Simulação N
Velocidade Crítica dos Moinhos (%)	70	74
Vazão de Alimentação (t/h)	430	430
P ₈₀ (mm)	0,127	0,126
Carga Circulante (%)	218	210
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	52
WI Operacional (kWh/t)	9,9	10,4
Eficiência na Moagem (%)	133	126
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

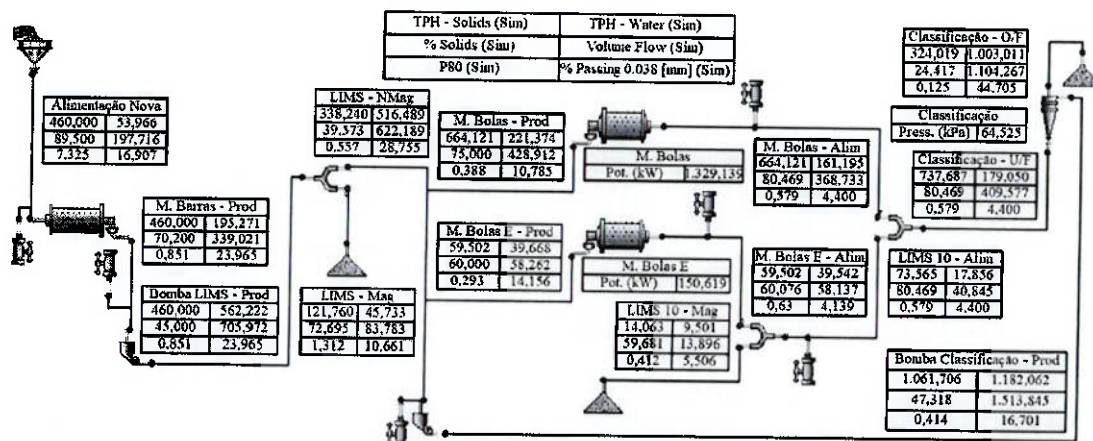
Fonte: Autoria Própria

O aumento da velocidade crítica diminui o tamanho de separação para 0,126 mm e diminui a carga circulante, porém consome mais energia e, portanto, diminui o valor da eficiência da moagem.

5.2.4.2. Ajuste da Simulação N

A Simulação N não quebrou nenhuma condição de contorno, portanto, buscou-se a máxima taxa de alimentação possível para o sistema em 74% da velocidade crítica. A Figura 31 mostra o fluxograma do ajuste da simulação.

Figura 31 – Fluxograma de Processo – Ajuste da Simulação N



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 33 compara as variáveis selecionadas correspondentes ao Caso Base e os resultados da simulação de ajuste. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 33 – Comparação Caso Base e Ajuste da Simulação N

Variáveis e Efeitos	Caso Base	Ajuste da Simulação P
Velocidade Crítica dos Moinhos (%)	70	74
Vazão de Alimentação (t/h)	430	460
P_{80} (mm)	0,127	0,125
Carga Circulante (%)	218	228
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	65
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,7
Eficiência na Moagem (%)	133	135
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria Própria

Comparado ao caso base, nota-se que o aumento de taxa para 460 toneladas por hora, possibilita ainda assim um sistema dentro das condições de contorno, sem estar tão próximos dos limites estabelecidos.

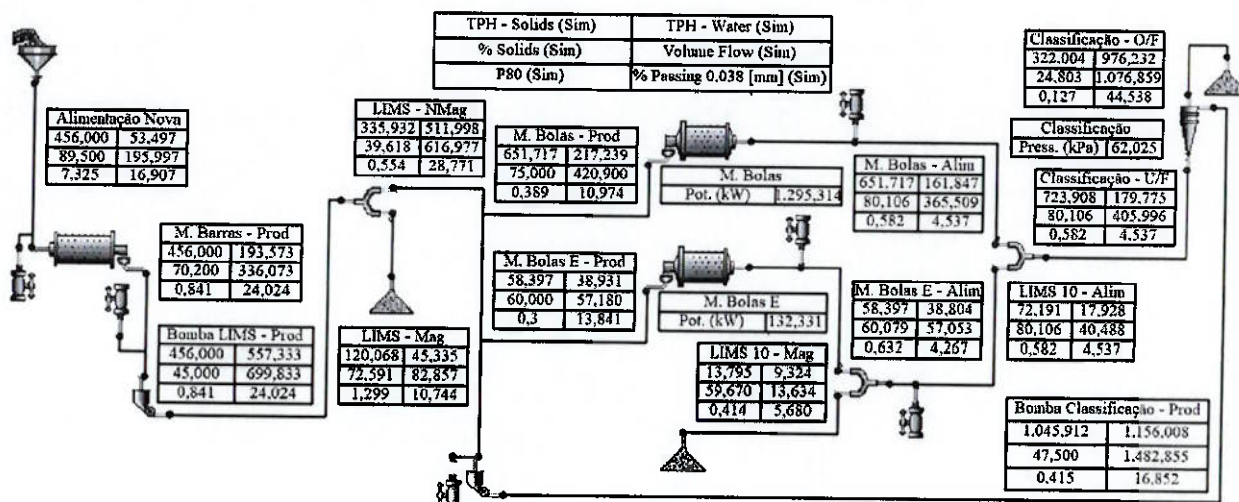
5.3. SIMULAÇÕES INTEGRADAS – AUMENTO DE VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO NOVA NO CIRCUITO

Esta seção apresenta os resultados e análises referentes às simulações integradas, visando aumentos de vazão de alimentação do circuito. Diferentemente das seções anteriores, neste caso a condição inicial da simulação não foi uma variável específica de processo, mas sim o aumento da vazão de alimentação e na sequência alterações de variáveis para ajustar as variações de carga circulante, pressão de operação de ciclones e na descarga dos ciclones.

5.3.1. Aumento de 6%

Primeiramente, buscou-se aumentar a vazão de alimentação nova do circuito em 6%. A Figura 32 apresenta o fluxograma de simulação correspondente.

Figura 32 – Fluxograma de Processo – Aumento de 6%



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 34 apresenta as mudanças nas variáveis selecionadas, comparando-se ao Caso Base e a simulação de aumento de 6% na vazão de alimentação do circuito. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 34 – Comparação Caso Base e Aumento de 6%

Variável	Caso Base	Aumento de 6%
Grau de Enchimento do Moinho (%)	28	30
Vazão de Alimentação (t/h)	430	456
P ₈₀ (mm)	0,127	0,127
Carga Circulante (%)	218	225
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	62
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,6
Eficiência na Moagem (%)	133	136
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

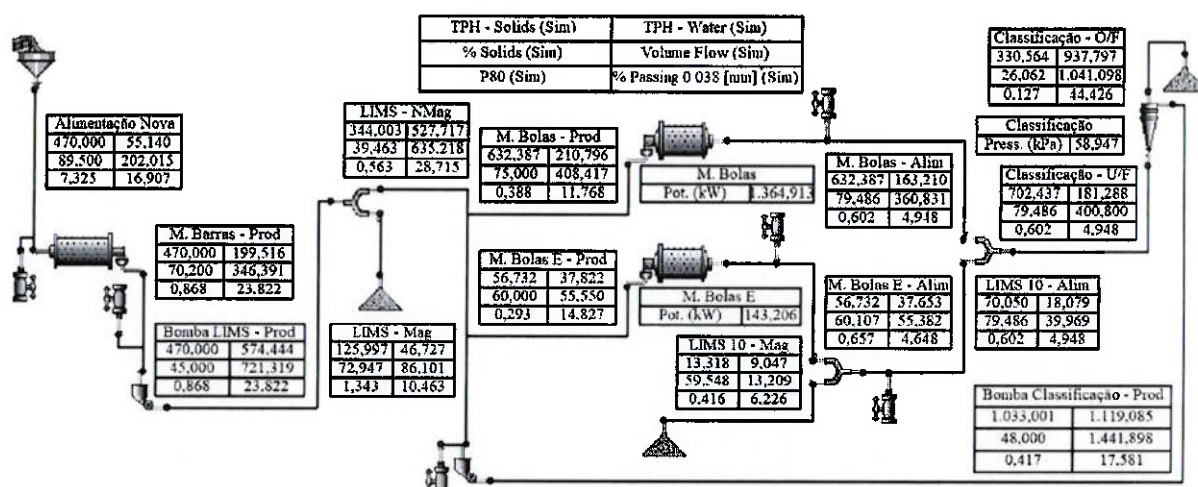
Fonte: Autoria Própria

Aumentos maiores do que 6% causam, nessa simulação, descarga do *underflow* em cordão.

5.3.2. Aumento de 9%

Na segunda simulação buscou-se aumentar a vazão de alimentação nova do circuito em 9%. A Figura 33 apresenta o fluxograma de simulação correspondente.

Figura 33 – Fluxograma de Processo – Aumento 9%



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 35 apresenta as mudanças nas variáveis selecionadas, comparando-se ao Caso Base e a simulação de aumento de 9% na vazão de alimentação do circuito. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 35 – Comparação Caso Base e Aumento de 9%

Variáveis e Efeitos	Caso Base	Aumento de 9%
Grau de Enchimento do Moinho (%)	28	33
Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	48
Vazão de Alimentação (t/h)	430	470
P ₈₀ (mm)	0,127	0,127
Carga Circulante (%)	218	212
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	58
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,8
Eficiência na Moagem (%)	133	134
Descarga do <i>Underflow</i> em Cordão	Não	Não

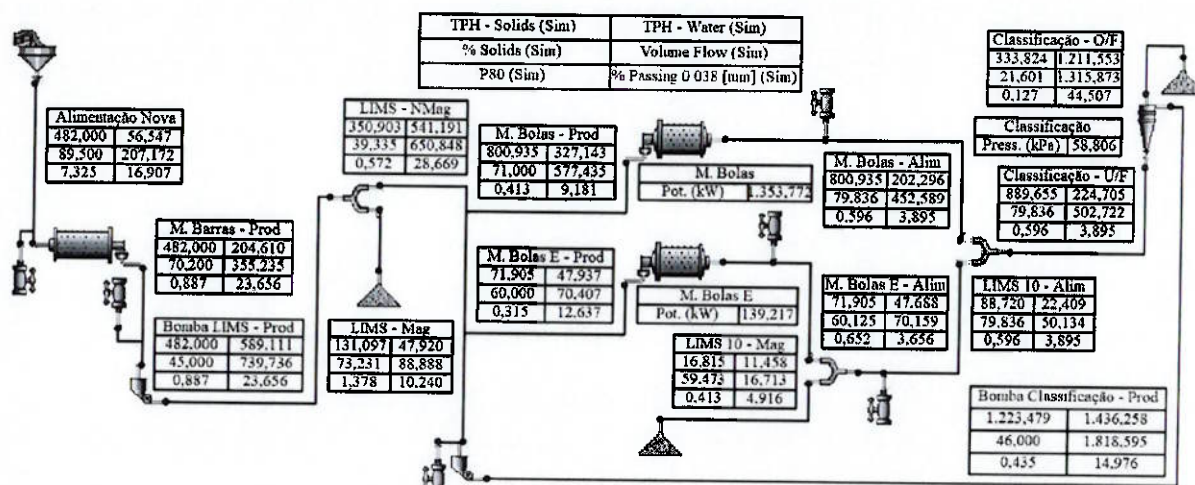
Fonte: Autoria Própria

O aumento do grau de enchimento do moinho de 28% para 33% possibilitou o aumento de 9% na alimentação nova do circuito, porém isso acarretou mudança no P₈₀ da classificação. A fim de chegar no tamanho de separação de 0,127 mm aumentou-se os sólidos na alimentação do ciclone de 47% para 48%.

5.3.3. Aumento de 12%

Na terceira simulação buscou-se aumentar a vazão de alimentação nova do circuito em 12%. A Figura 34 apresenta o fluxograma de simulação correspondente.

Figura 34 – Fluxograma de Processo – Aumento de 12%



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 36 apresenta as mudanças nas variáveis selecionadas, comparando-se ao Caso Base e a simulação de aumento de 12% na vazão de alimentação do circuito. As variáveis alteradas antes da simulação (causa) estão grafadas em negrito, enquanto as demais variáveis (efeitos) não recebem esse destaque.

Tabela 36 – Comparação Caso Base e Aumento 12%

Variável	Caso Base	Aumento de 12%
Grau de Enchimento do Moinho (%)	28	33
Sólidos na Alimentação do Ciclone (%)	47	46
Número de Ciclones em Operação	4	5
Sólidos na Alimentação do Moinho (%)	75	71
Vazão de Alimentação (t/h)	430	482
P ₈₀ (mm)	0,127	0,127
Carga Circulante (%)	218	224
Pressão de alimentação dos Ciclones (kPa)	55	62
WI Operacional (kWh/t)	9,9	9,7
Eficiência na Moagem (%)	133	135
Descarga do Underflow em Cordão	Não	Não

Fonte: Autoria própria

A fim de se manter o P_{80} da classificação em 0,127 mm somado ao aumento da vazão de alimentação nova no circuito (simulado para 482 t/h) foi necessário corrigir problemas de descarga em cordão e uma classificação muito fina ao aumentar o grau de enchimento do moinho, para realizar o ajuste acrescentou-se mais um ciclone em operação ao circuito e diminuiu-se a concentração de sólidos tanto na alimentação do moinho quanto na alimentação dos ciclones, respectivamente, de 75% para 71% e de 47% para 46%.

6 CONCLUSÕES

A partir da análise das variáveis individuais e observação dos efeitos causados pelas mesmas foi possível realizar simulações de aumento de vazão nova de alimentação do circuito de moagem selecionado. Alterações das variáveis de geometria e condições de operação dos ciclones, além de serem mais simples que as realizadas em moinhos, se mostraram mais efetivas, uma vez que pequenas mudanças nestas variáveis resultaram em grandes alterações no circuito. A título de exemplo, uma diminuição de 3% na concentração de sólidos da alimentação dos ciclones resultou em redução do P_{80} de 0,127 mm para 0,115 mm, com consequente aumento da carga circulante de 218% para 344%, além do aumento da pressão de operação dos ciclones de 55 kPa para 119 kPa. O aumento do diâmetro de *apex* de 122 mm para 140 mm acarretou redução do P_{80} de 0,127 mm para 0,122 mm, com aumento da carga circulante de 218% para 279%. O diâmetro de *vortex* de 254 mm para 305 mm aumentou o tamanho de classificação de 0,127 mm para 0,135 mm ao mesmo tempo que diminuiu a carga circulante de 218% para 168%. Aumentar o número de ciclones em operação resultou em uma diminuição de pressão de 55 kPa para 33 kPa, juntamente com o aumento do P_{80} de 0,127 mm para 0,133 mm. Por outro lado, alterações de velocidade de rotação e alteração no tamanho máximo de corpos moedores não apresentaram efeitos significativos, em comparação àqueles obtidos nas simulações dos ciclones. Já o grau de enchimento e concentração de sólidos na alimentação do moinho indicaram possibilidade de aumento de vazão de alimentação do circuito sem, no entanto, causar grandes alterações na carga circulante e na granulometria do produto do circuito.

Baseado nas simulações de variáveis individuais dos equipamentos foram executadas simulações integradas do circuito visando explorar cenários de aumentos fixos de capacidade de processamento. O primeiro cenário, de aumento de 6% na vazão de alimentação nova do circuito, ou seja, de 430 t/h para 455 t/h, foi obtido mediante à elevação do grau de enchimento do moinho de 28% para 30%. Neste mesmo cenário foi mantido o P_{80} do produto em 0,127 mm para efeito de comparação.

O segundo cenário consistiu no aumento de 9% na vazão de alimentação nova do circuito. Neste caso, para atingir o objetivo foram incluídas duas alterações, quais sejam, elevação do grau de enchimento do moinho de 28% para 33% e aumento a

concentração de sólidos na alimentação dos ciclones de 47% para 50%. Os resultados indicaram aumento na vazão de alimentação nova de 430 t/h para 470 t/h, mantendo-se o P_{80} do produto em 0,127 mm.

O terceiro e último cenário simulado teve como objetivo um incremento de 12% na vazão de alimentação nova do circuito. Neste caso, além da elevação do grau de enchimento de 28% para 33% decidiu-se incluir um ciclone em operação, passando de 4 para 5 unidades. Para ajuste do P_{80} houve necessidade de diminuição da concentração de sólidos da alimentação do ciclone de 47% para 48%, assim como a diminuição da concentração de sólidos na alimentação do moinho de 75% para 71%. O conjunto dessas alterações resultou em um cenário consistente para a elevação de capacidade estipulada.

REFERÊNCIAS

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1987. 143 p.

CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**. 3ª Edição. São Paulo: Signus Editora, 2006.

DELBONI JR., H. **Modelagem de Operação de Moinhos de Bolas**. São Paulo, 2012. Apostila.

GOMES, W. L. **Integração de Modelos Energéticos e de Balanço Populacional para Simulação de Moagem em Moinhos de Bolas**, 2014.

HDA Serviços S.S. Ltda. **Análise de Desempenho do Circuito de Moagem**. São Paulo: ____, 2015.

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

KELSALL, D. F. **A further study of the hydraulic cyclone**. Chemical Engineering Science, 1953. p. 254-272.

KING, R. P. **Modelling and Simulation of Mineral Processing System**. Utah: Butterwoeth-Heinemann, 2001.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de Minérios**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2018.

NAGESWARARAO, K. *Further developments in the modeling a scale up for industrial hydrocyclones*. PHD Thesis, University of Queensland (JKMRC). 1978.

NAPIER-MUNN, T. J. *et al.* **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation**. Queensland (JKMRC), 1996. 413 p.

ROWLAND JR, C. A. **Selection of Rods Mills, Ball, Mills, Pebble Mills and Re grind Mills**. Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Belletin, May 1983.