



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



PEDRO BRANDÃO SILVA

SIMULAÇÃO ESTÁTICA DE UMA PLANTA DE MINÉRIO DE FERRO.

Ouro Preto MG
2026

PEDRO BRANDÃO SILVA

SIMULAÇÃO ESTÁTICA DE UMA PLANTA DE MINÉRIO DE FERRO.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Ouro Preto - MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586s Silva, Pedro Brandão.
Simulação estática de uma planta de minério de ferro. [manuscrito] /
Pedro Brandão Silva. - 2026.
45 f.: il.: , gráf..

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Planta. 2. Minérios de ferro. 3. Modelos
matemáticos - Simulação por computador. I. Alves, Vladimir
Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.7:004.94

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Brandão Silva

Simulação Estática de uma PLANTA de Minério de Ferro.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 06 de março de 2026

Membros da banca

Doutor- Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Mestre - Jacinto Tchipa Daniel Cumena - (Mineração Ipê)

Mestre - Marco Aurélio Soares Martins - (CEMI)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/05/2026



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/05/2026, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1115282** e o código CRC **EECF4398**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Viviani e ao meu pai Lander por me apoiarem e me proporcionarem a oportunidade de estudar.

Agradeço ao meu orientador Vladimir Kronemberger Alves.

Agradeço a Escola de Minas e ao Demin pelo ensino gratuito e de qualidade;

Agradeço a CEMI e a todo o time pelos ensinamentos e oportunidades.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a simulação estática de uma planta de beneficiamento de minério de ferro, utilizando o software USIM PAC, com o objetivo de realizar a análise geral da planta e confirmar os resultados de amostragem no software. A metodologia baseou-se na reprodução do fluxograma de uma Mineradora de ferro da área do quadrilátero ferrífero, englobando as etapas de britagem em três estágios, moagem em circuito fechado, deslamagem em dois estágios e flotação. A modelagem foi estruturada em duas fases: inicialmente, utilizou-se modelos de Nível 0 (*flowsheeting*) para a consolidação dos balanços de massa e água, calibrando a distribuição granulométrica e a partição de fluxos conforme dados industriais. Posteriormente, a simulação evoluiu para uma abordagem preditiva, adotando-se modelos dimensionais para a cominuição (ex: *Jaw Crusher 1*) e modelos cinéticos fenomenológicos para a concentração. A etapa de flotação foi simulada através do modelo Flotation 2B, fundamentado em cinética de primeira ordem e na existência de subpopulações de flotabilidade, permitindo prever a resposta metalúrgica frente a variações na alimentação. Os resultados obtidos validam a consistência dos modelos matemáticos na representação da usina virtual e permitem avaliar os ganhos potenciais em recuperação metalúrgica e qualidade do concentrado (*Pellet Feed*), demonstrando a eficácia da simulação computacional como ferramenta de engenharia e otimização de processos.

Palavras-chave: Simulação estática; USIM PAC; beneficiamento de minério de ferro; modelo de fases; modelagem Matemática.

ABSTRACT

This work presents the static simulation of an iron ore beneficiation plant using the USIM PAC software, with the objective of performing an overall analysis of the plant and validating sampling results within the software. The methodology was based on reproducing the flowsheet of an iron ore mining operation located in the Quadrilátero Ferrífero region, encompassing three-stage crushing, closed-circuit grinding, two-stage desliming, and flotation. The modeling was structured in two phases: initially, Level 0 models (flowsheeting) were used to consolidate mass and water balances, calibrating particle size distribution and stream partitioning according to industrial data. Subsequently, the simulation evolved into a predictive approach, adopting dimensional models for comminution (e.g., Jaw Crusher 1) and phenomenological kinetic models for concentration. The flotation stage was simulated using the Flotation 2B model, based on first-order kinetics and the existence of floatability subpopulations, allowing the prediction of metallurgical response under variations in feed conditions. The obtained results validate the consistency of the mathematical models in representing the virtual plant and enable the assessment of potential gains in metallurgical recovery and concentrate quality (Pellet Feed), demonstrating the effectiveness of computational simulation as a tool for engineering and process optimization.

Keywords: Static simulation; USIM PAC; iron ore beneficiation; model phases; mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de processos da Mineradora de ferro analisada. Fonte: Adaptado do fluxograma de engenharia da planta estudada	6
Figura 2 – Metodologia proposta para configuração antecipada via simulação integrada. Fonte: Martins et al. (2024)	13
Figura 3 – Réplica do fluxograma de engenharia da Mineradora de Ferro no USIM PAC. Fonte: Autor.....	16
Figura 4 – Curva granulométrica do ROM. Fonte: Autor	17
Figura 5 – Britagem e peneiramento primários – Modelo 0. Fonte: Autor.....	17
Figura 6 – Britagem e peneiramento terciários – Modelo 0. Fonte: Autor	18
Figura 7 – Classificação da moagem – Modelo 0. Fonte: Autor.....	19
Figura 8 – Moagem – Modelo 0. Fonte: Autor.....	20
Figura 9 – Flotação – Modelo 0. Fonte : Autor	21
Figura 10 – Espessamento e filtragem. Fonte: Autor.....	22
Figura 11 – Jaw Crusher (1). Fonte: Autor.....	24
Figura 12 – Flotation (2B). Fonte: Autor	25
Figura 13 – Curvas granulométricas e relação com D_{80} . Fonte: Autor	26
Figura 14 – Gráfico de dispersão da taxa (t/h) medida vs. simulada. Fonte: Autor	27
Figura 15 – Gráfico de dispersão do % de sólidos medido vs. simulado. Fonte: Autor	28
Figura 16 – Gráfico de dispersão do teor de Fe medido vs. simulado. Fonte: Autor	28
Figura 17 – Comparação da recuperação metalúrgica e mássica global: real vs. simulado. Fonte: Autor.....	30
Figura 18 – Comparação da recuperação metalúrgica e mássica da flotação: real vs. simulado. Fonte: Autor.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
WI	<i>Work Index</i>
CSS	<i>Closed Side Setting</i>
ROM	<i>Run of Mine</i>
OTS	<i>Operator Training Simulator</i>
OF	<i>Overflow</i>
UF	<i>Underflow</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
τ	tau
σ	Letra grega Sigma
ρ	Rho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais.....	2
1.1.1	Objetivos.....	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Processamento de Minério de Ferro	4
2.2	A planta da mineradora de ferro da região do Quadrilátero Ferrífer	5
2.2.1	Britagem e peneiramento	7
2.2.2	Moagem e classificação	8
2.2.3	Concentração e Filtragem	8
2.3	Simulação de processos minerais	10
2.3.1	O Software USIM PAC	10
2.3.1.1	Modelagem Fenomenológica e modelos matemáticos.....	11
2.4	Simulação dinâmica	13
3	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	Construção do fluxograma e calibração do Modelo 0	15
3.2	Refinamento dos modelos: Transição para os níveis 1 e 2.....	22
4	RESULTADOS	26
4.1	Validação granulométrica do circuito	26
4.2	Comparativo medido vs. simulado: vazão, teor e sólidos.....	27
4.3	Análise da recuperação mássica e metalúrgica	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
	Referências	33

1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento mineral é uma etapa essencial da cadeia produtiva da mineração, pois estabelece a conexão entre a extração do minério na jazida e a entrega do produto final, atendendo às demandas do mercado. Em um contexto marcado pela transição energética e pela busca por processos mais sustentáveis, o minério de ferro continua ocupando uma posição estratégica, o que impõe às usinas de beneficiamento a necessidade de alcançar níveis cada vez mais elevados de eficiência e qualidade na produção de concentrados, como o *pellet feed*, indispensável à siderurgia moderna.

As operações de beneficiamento compreendem um conjunto de processos físicos e físico-químicos, tais como britagem, moagem, concentração e filtragem. O bom funcionamento dessas etapas está diretamente relacionado ao correto dimensionamento e à adequada integração dos processos, uma vez que ineficiências em uma etapa podem comprometer as etapas subsequentes.

De modo geral, as plantas de beneficiamento são projetadas e construídas com o intuito de produzir concentrados com maior teor e menor contaminação possíveis. No entanto, o progressivo esgotamento das reservas de hematitas compactas levou a indústria mineral a direcionar seus esforços para o aproveitamento de itabiritos, caracterizados por menores teores de ferro e por uma ganga predominantemente quartzosa. Conforme apontam (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010), essa mudança na tipologia mineralógica aumentou significativamente a complexidade dos processos de separação, tornando indispensáveis etapas de cominuição e classificação mais eficientes, com o intuito de buscar garantir a liberação mineral necessária para uma concentração de qualidade.

Nesse contexto, a cominuição assume papel indispensável no beneficiamento, não apenas por representar uma parcela expressiva dos custos operacionais, mas também por ser a operação unitária com maior consumo de energia elétrica em uma planta, podendo atingir entre 30% e 50% do consumo total. Segundo (BERALDO, 1987), a moagem tem como objetivo reduzir o minério a uma granulometria suficiente para promover a liberação do mineral útil da ganga. Entretanto, quando esse processo não é controlado devidamente, podem ocorrer problemas como a sobremoagem, que gera lamas prejudiciais à recuperação metalúrgica, ou a baixa liberação, que compromete a qualidade do produto final.

O desempenho de um circuito de moagem está diretamente relacionado à sua configuração e à eficiência do sistema de classificação associado. Na planta de beneficiamento de minério de ferro, foco deste estudo, opera-se um circuito fechado reverso, no qual a classificação ocorre antes da alimentação do moinho. Dados operacionais e campanhas de amostragem indicam a presença de uma carga circulante persistente em torno de 300%. De acordo com (SILVA; MARTINS, 2010), valores elevados de carga circulante são indicativos clássicos de ineficiência operacional, sugerindo que o moinho de bolas apresenta limitações de volume ou potência para processar

adequadamente a carga de retorno. Esse cenário reflete os desafios de equilibrar o balanço de massa global frente à variabilidade do minério.

Diante dessa complexidade, a análise isolada de parâmetros operacionais de campo muitas vezes não é suficiente para identificar a melhor estratégia de otimização do processo. Nesse sentido, a simulação estática de processos minerais surge como uma ferramenta eficaz e de baixo custo para a avaliação de diferentes cenários operacionais. Por meio do software USIM PAC, baseado em balanços de massa rigorosos e modelos consagrados, torna-se possível representar a planta de forma fiel à realidade e, assim, avaliar diferentes alternativas operacionais.

1.1 Considerações iniciais

Este trabalho consiste no diagnóstico e na otimização do circuito de um moinho de bolas de uma Mineradora X do quadrilátero ferrífero, em uma planta de processamento de minério de ferro itabirítico com capacidade nominal de 6 Mtpa de *Pellet feed*. Por meio de simulações no software USIM PAC, o estudo investiga as causas da elevada carga circulante e propõe alternativas de redimensionamento e de ajustes operacionais.

O domínio de ferramentas de simulação permite que o engenheiro preveja o comportamento de equipamentos frente a variações na litologia e na dureza do minério. De acordo com (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010), a modelagem fenomenológica é uma ferramenta eficaz para converter a variabilidade mineralógica em parâmetros de projeto confiáveis. Assim, a relevância deste trabalho reside na sistematização de uma metodologia que integra a reconciliação de dados reais de planta a modelos matemáticos, contribuindo para a sustentabilidade operacional e a previsibilidade técnica em cenários de mudança, como, por exemplo, o aumento da taxa de alimentação.

1.1.1 Objetivos

Desenvolver e validar o modelo matemático estático global da planta de beneficiamento de minério de ferro, utilizando o software USIM PAC para a consolidação de um balanço mássico e metalúrgico, que sirva como ferramenta de diagnóstico e previsibilidade operacional.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir o fluxograma integrado da planta, abrangendo as etapas de britagem, peneiramento, moagem, deslamagem, flotação e filtração.
- Realizar a reconciliação dos dados das campanhas de amostragem industrial, garantindo a consistência estatística do balanço de massa global.
- Calibrar os parâmetros operacionais e fenomenológicos dos equipamentos de cominuição e classificação com base em dados reais de planta.

- Validar o modelo por meio da comparação entre os resultados simulados e os dados coletados em campo, comprovando a convergência de teores, vazões e distribuições granulométricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processamento de Minério de Ferro

O minério de ferro constitui a principal matéria-prima da indústria siderúrgica, sendo essencial para a produção de aço e, conseqüentemente, para o desenvolvimento industrial e econômico global. Do ponto de vista mineralógico, o ferro ocorre na natureza principalmente na forma de óxidos e hidróxidos, destacando-se minerais como hematita, magnetita, goethita e limonita. Dentre esses, a hematita é o mineral de ferro mais explorado para fins industriais, tanto por sua elevada concentração quanto por sua ampla distribuição em jazidas (DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001).

A hematita é um óxido de ferro cuja fórmula química é Fe_2O_3 e apresenta teor teórico de ferro em torno de 69,9%. Conforme (KLEIN; DUTROW, 2007), a hematita cristaliza no sistema trigonal e pode ocorrer sob diversas formas texturais, incluindo cristais maciços, especulares (especularita), compactas e terrosas. Na natureza, é frequentemente encontrada em depósitos sedimentares e metamórficos, associados a formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formations* – BIFs), que constituem a principal fonte dos grandes depósitos de minério de ferro do mundo. No Brasil, destacam-se o Quadrilátero Ferrífero e Carajás, historicamente referências na produção nacional de minério de ferro de alto teor.

Os minérios hematíticos de alto teor caracterizam-se por apresentar baixos teores de contaminantes, como a sílica SiO_2 , o que permite um beneficiamento mais simplificado e com menor utilização de água, geralmente restrito às etapas de britagem, peneiramento e classificação granulométrica. No entanto, a exploração contínua dessas reservas, ao longo das últimas décadas, impôs à indústria mineral brasileira a necessidade de processar minérios de menor teor, frequentemente itabiríticos (CHAVES, 2012).

Segundo (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010), o itabirito é uma rocha metamórfica derivada de formações ferríferas bandadas, caracterizadas pela alternância de camadas ricas em minerais de ferro (predominantemente hematita e magnetita) e camadas ricas em quartzo SiO_2 . Em comparação com as hematitas compactas, os itabiritos apresentam teores de ferro significativamente mais baixos e maior associação com a ganga quartzosa. A resistência dessa matriz silicosa influencia diretamente a moagem, tornando a cominuição uma operação de elevado custo operacional e alto consumo energético. Além disso, a forte associação física entre os óxidos e a ganga impõe dificuldades à liberação mineral, exigindo redução a escalas micrométricas, o que aumenta a complexidade das operações de beneficiamento para a obtenção de produtos comercializáveis.

A liberação mineral representa o estágio fundamental em que os minerais de interesse são fisicamente separados, resultando em partículas que, idealmente, apresentariam uma composição mineralógica única; na prática, entretanto, nenhum processo é 100% eficiente, e produtos com

partículas mistas são esperados. Como descrito por (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010), a eficiência da liberação está diretamente ligada a parâmetros geológicos e texturais, como o tamanho de grão, a morfologia do material e a coesão entre interfaces das fases minerais presentes. Para o caso dos itabiritos brasileiros, a liberação adequada para flotação reversa ou separação magnética de alta eficiência é geralmente atingida em faixas granulométricas finas ou ultrafinas, abaixo de 0,150 mm. Nesses casos, a submoagem pode acarretar a produção de partículas mistas, comprometendo a recuperação metalúrgica e o teor do concentrado final.

De acordo com a gênese e a variabilidade dos depósitos ferríferos no Brasil, o comportamento desses materiais durante a fragmentação é influenciado pelo contexto geológico regional, conforme discutido por Dardenne e Schobbenhaus (2001), o que justifica a operação frequente desses equipamentos em circuito fechado com hidrociclones para assegurar o controle granulométrico.

A produção de *pellet feed* configura o estágio de maior valor agregado na cadeia produtiva do minério de ferro, exigindo um concentrado com especificações químicas e físicas restritas. Para atender aos requisitos de qualidade, o produto deve apresentar uma distribuição granulométrica em que, no mínimo, 88% das partículas sejam inferiores a 0,044 mm (325 mesh), além de uma superfície específica (Blaine) mínima de 1.650 cm²/g. Tais propriedades são importantes para garantir tanto a cinética das reações de redução siderúrgica quanto a resistência mecânica das pelotas no transporte transoceânico. Complementarmente, (CHAVES, 2012) ressalta que o controle da viscosidade e do comportamento reológico da polpa, frequentemente caracterizada como um fluido plástico de Bingham, é essencial para manter a estabilidade do processo e a integridade da pelletização.

Nesse cenário, a cominuição (britagem e moagem) assume papel estratégico na transformação do ROM em tamanhos centimétricos e micrométricos respectivamente, com o desafio de cominuir o material apenas até o limite necessário às etapas de concentração, mitigando o consumo energético desnecessário. Tanto na moagem primária quanto na secundária, o moinho de bolas consolida-se como uma das tecnologias mais versáteis, operando por meio da combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito.

2.2 A planta da mineradora de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero

A Unidade de Tratamento de Minério da Mineradora X foi criada com o objetivo de processar minérios de ferro itabiríticos, visando à produção de *pellet feed* de sílica abaixo de 5% (com D_{90} em 0,15 mm e umidade controlada). A planta opera com o circuito clássico de britagem 1^{ra} e 2^{ra} com peneiramento 1^{ra}, integradas com as etapas de classificação, concentração por flotação e desaguamento, com o intuito de maximizar a recuperação metalúrgica e assegurar a estabilidade operacional do circuito. A Figura 1 apresenta a representação esquemática do fluxograma de engenharia da planta, permitindo obter um panorama geral da infraestrutura.

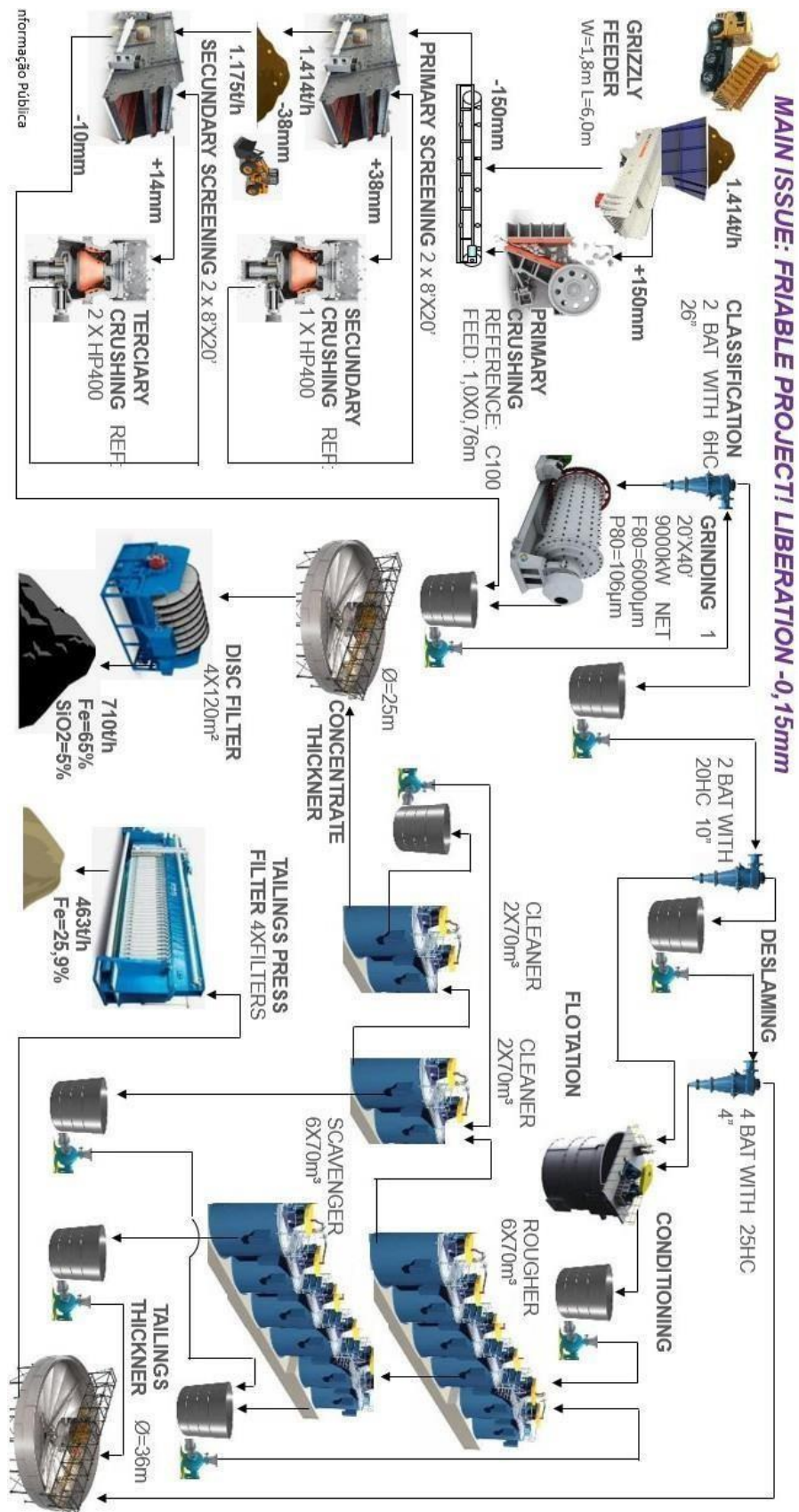


Figura 1 – Fluxograma de processos da Mineradora de ferro analisada. Fonte: Adaptado do fluxograma de engenharia da planta estudada.

O processo se inicia com a alimentação do ROM (*run of mine*), com teor de Fe de aproximadamente 47%. Pelo balanço de massas, a taxa de alimentação na base seca na etapa de britagem primária e peneiramento é de 1444 t/h, com teor de sólidos de 93,5%.

2.2.1 Britagem e peneiramento

A britagem primária constitui o primeiro estágio de cominuição, tendo como função principal a fragmentação das rochas de minério provenientes da lavra para tamanhos compatíveis com o transporte por correias e adequados para as próximas etapas. O fluxo de processamento da planta se inicia na Britagem Primária onde o ROM (Run of Mine) é descarregado em uma moega de recebimento que alimenta um britador de mandíbulas, que é amplamente utilizado devido à sua robustez e capacidade para lidar com rochas de maior dimensão e mais abrasivas. Essa etapa opera em conjunto com uma grelha vibratória de escalpe, que tem como função separar os finos naturais, evitando a entrada no britador de mandíbulas. Segundo os dados de balanço de massa da unidade, comprovados com amostragem, o passante da grelha gira em torno de 85% da alimentação (1227,7 t/h) enquanto 15% (216,7 t/h) corresponde ao *oversize* que é direcionado ao britador.

O material britado segue para as etapas de Britagem secundária e Terciária que operam na planta com britadores cônicos. A escolha britadores cônicos nestas etapas deve-se à sua eficiência na produção de agregados mais finos e uniformes que são essenciais para a alimentação da moagem, operando por meio de um manto que gira em torno de uma câmara côncava, com superfícies paralelas na zona de descarga, para garantir maior tempo de retenção (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). A dinâmica do circuito de britagem primária e secundária, seguindo o balanço de massas, envolve o processamento de uma carga circulante de 40%, em que o produto do britador secundário, na ordem de 577,7 t/h, une-se a alimentação nova de 1444,4 t/h para compor a alimentação das peneiras, garantindo que o material seja reduzido até a granulometria de interesse (< 38 mm). Antes de seguir para a britagem terciária onde a alimentação nova é dividida em para dois peneiramentos que direcionam o *oversize* para seus respectivos britadores cônicos trabalhando em circuito fechado com carga circulante de 636,0 t/h que significa 53%.

Esses britadores operam em circuito fechado com o peneiramento, realizado por peneiras vibratórias inclinadas do tipo banana 8'x20', que possibilitam a classificação que ocorre com a percolação das partículas pela tela e seleção das partículas passantes pelo seu gabarito. De acordo com os parâmetros operacionais da planta, a alimentação do peneiramento primário resulta da soma da carga nova com a carga circulante. O *oversize*, com aproximadamente 577,7 t/h, retorna para a britagem 3^ª constituindo a carga circulante, enquanto o *undersize*, com 1.175 t/h, é liberado como produto final da britagem, atendendo à meta de obter um material 100% passante na malha de corte, destinado à pilha-pulmão.

2.2.2 Moagem e classificação

A etapa de Moagem e Classificação é onde ocorre a liberação mineral, representando o último estágio de cominuição, onde as partículas são reduzidas a dimensões que permitem a separação física entre o mineral valioso (hematita) e a ganga (quartzo). A moagem é a operação unitária de maior consumo energético no beneficiamento, operando por meio da combinação de impacto, compressão e abrasão para garantir a liberação adequada para os processos posteriores de concentração, sendo que a submoagem acarreta em perdas de recuperação, enquanto a sobremoagem gera lamas prejudiciais à flotação e desperdício de energia.

O circuito utiliza um moinho de bolas de grande porte, com dimensões de 20' de diâmetro por 39" de comprimento e potência instalada de 8222,6 KW. Os moinhos de bolas são equipamentos cilíndricos rotativos que contêm uma carga de corpos moedores (esferas de aço) que ocupam cerca de 30 a 45% do volume interno; ao girar, o moinho eleva a carga até um ponto onde a força da gravidade supera a centrífuga, fazendo com que as bolas caiam em movimento de catarata, o que promovendo quebra por impacto, ideal para partículas grossas e rolem em movimento de cascata promovendo moagem fina por abrasão, sendo a escolha deste equipamento ditada pela necessidade de uma moagem fina e eficiente para a liberação do itabirito (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O moinho neste caso opera em circuito fechado reverso com baterias de hidrociclones de 26" que diferentemente do circuito direto que é alimentado primeiro o moinho, a alimentação nova é direcionada primeiramente à classificação. Os hidrociclones são equipamentos que utilizam a força centrífuga para classificar partículas segundo tamanho e densidade; a polpa entra tangencialmente sob pressão criando um vórtice onde as partículas finas e leves migram para o centro e sobem pelo vortex finder (*overflow*), e as partículas grossas e densas são arremessadas contra as paredes e descem para o apex (*underflow*) (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Esta configuração é estratégica, pois retira imediatamente os finos naturais já liberados presentes no pellet feed da alimentação, evitando a sobremoagem e descarregando o moinho, o que otimiza a capacidade produtiva e eficiência energética global do circuito.

Segundo os dados do balanço de massa, a alimentação nova destinada a área moagem gira em torno de 1175 t/h, taxa que é direcionado aos hidrociclones. O moinho recebe, portanto, o *underflow* da classificação que é composto pela carga circulante somada a fração grossa da alimentação nova, totalizando um fluxo de alimentação de 4800 t/h no equipamento, o que resulta fazendo a relação da alimentação nova com a total uma carga circulante de 300%, um valor acima do característico para uma operação de moagem que gira em torno de 250%.

2.2.3 Concentração e Filtragem

O *overflow* da moagem, já com a granulometria controlada, é direcionado para a deslamagem, onde ocorre a operação unitária de deslamagem que é a etapa preparatória crítica e mandatória na rota de flotação de minério de ferro. O objetivo principal dessa operação é a

remoção de partículas ultrafinas (lama), geralmente menores que 0,01mm, que por ter elevada área superficial específica prejudicam a seletividade da flotação causando o alto consumo de reagentes e o recobrimento das partículas, em que as lamas aderem às superfícies das partículas de interesse impedindo a ação dos coletores. Na planta de estudo o corte granulométrico é realizado através de dois estágios de hidrociclones de pequeno diâmetro (10" e 4"), resultando, conforme o balanço de massas, na remoção de aproximadamente 96 t/h de lama no overflow do segundo estágio, consolidando uma alimentação efetiva para a flotação de 1104 t/h com uma densidade de polpa ajustada para 65,13% de sólidos.

Após a deslamagem, a polpa, com densidade ajustada e praticamente livre de ultrafinos, alimenta o circuito de Flotação, que utiliza a flotação catiônica reversa, o método padrão para o beneficiamento de itabiritos no Brasil. Neste sistema físico-químico, a separação das partículas é feita a partir da conversão da camada superficial da sílica em hidrofóbica e aerofílica, se agregando as bolhas de ar inseridas no sistema e sendo recolhida na espuma, enquanto o ferro permanece hidrofílico e com ajuda dos depressores são recolhidos no afundado. Para atingir a seletividade no processo são utilizados reagentes, como as aminas (éter-aminas) que são agentes coletores, adsorvendo na superfície da ganga, carregada negativamente em pH alcalino, por atração eletrostática, e o amido como agente depressor, o qual se adsorve seletivamente sobre os óxidos de ferro e juntamente com a ação da amina garante que não seja arrastado pelas bolhas de ar. O circuito da Mineradora é configurado em estágios *Rougher* (desbaste), *Scavenger* (recuperação), *Cleaner* e *Recleaner* (limpeza), que é um fluxo clássico para maximizar recuperação e teor.

O processo tem início no estágio *Rougher*, recebendo o montante da carga circulante *Cleaner* e a alimentação nova da flotação com taxa de 1104 t/h que juntamente com a carga circulante passa a ser de 1157,5 t/h e teor médio de 52% e entregando o concentrado já enriquecido para 60,90% de Fe seguindo para a etapa *Cleaner* e o rejeito da *Rougher 1* segue para o espessador de rejeitos. Diferentemente de circuitos convencionais, a usina utiliza a estratégia de retratamento em que o concentrado *Rougher* alimenta a etapa *cleaner*, que gera um concentrado de 64,40% e subsequentemente a *Recleaner* que é responsável pela concentração final, entregando o produto com uma vazão de 701,8 t/h e teor de 66,20% de Fe para atender as especificações de Pellet Feed

Para garantir a eficiência global e evitar perdas de minério nas etapas o rejeito da etapa *Cleaner* com taxa de 283,7 t/h com 50,12% de Fe não é descartado integralmente; ele passa por uma divisão o fluxo segue para a alimentação *Scavenger*, porém tem a opção de retornar como carga circulante para a alimentação da *Rougher 1* por meio de um *bypass*, a fim de reaproveitar o fluxo ainda rico em Fe. A etapa *Scavenger*, alimentada pelos rejeitos *Rougher 2* e *3* e pela fração do rejeito *Cleaner*, processa uma carga de aproximadamente 445 t/h, gerando um concentrado com recuperação de 50,55% que retorna ao início do circuito, e seu rejeito com 19,03% de Fe compõe o rejeito final da flotação juntamente com a lama, com aproximadamente 402 t/h, seguindo para a filtragem de rejeito.

E o processamento dos produtos sólidos se encerra na etapa de espessamento e filtragem, se dividindo em espessador de concentrado e de rejeito com o fim de assegurar a qualidade do

produto, a recuperação de água e a estabilidade geotécnica. Na linha do concentrado com teor de Fe final de 66,20% o produto é adensado no espessador para 65% de sólidos e direcionado para a Filtragem, onde são utilizados filtros de disco a vácuo que reduzem a umidade para 10% (90% de sólidos), chegando no Pellet Feed pronto para a expedição Paralelamente, o rejeito final da flotação é combinado com as lamas da deslamagem e direcionado ao Espessador de Rejeitos, cujo underflow com 45% de sólidos alimenta a filtragem de rejeitos, produzindo uma torta com 84% de sólidos que busca viabilizar a disposição em pilhas (dry stacking) e maximiza o reaproveitamento da água industrial na planta.

2.3 Simulação de processos minerais

A simulação de processos minerais é hoje uma das ferramentas fundamentais para a previsão e testes de funcionamento de processos, tendo evoluído de um instrumento de estimativa para um elemento central na engenharia de processos que permite a exploração de interações complexas entre unidades operacionais, dimensionamento e redimensionamento de equipamentos e análises químicas. No processamento, o desafio principal reside na natureza intrínseca do material, um sólido particulado cujas propriedades de tamanho, composição mineralógica, densidade e dureza variam continuamente e exigem modelos robustos baseados no balanço populacional para rastrear essas propriedades a medida que são formadas ao longo do fluxograma (KING, 2001).

Nesse contexto, a simulação estática, que é a base metodológica deste trabalho, consolida essas variáveis com o balanço de massa e energia, funcionando como uma "planta virtual", essencial para o diagnóstico e a otimização de circuitos industriais; assim como é feito pelo software USIM PAC, que opera sob esse regime, permitindo modelar o comportamento da usina de forma a inicialmente igualar aos resultados do balanço de massas, representando de forma fiel, e posteriormente remodelada para ganho de produção caso necessário. Esta abordagem é utilizada tanto em projetos *Greenfield*, para dimensionar equipamentos e testar rotas antes da construção física, quanto em projetos *Brownfield*, onde modelos calibrados com dados industriais permitem identificar gargalos produtivos e prever o impacto de alterações na alimentação sem modificar a operação real (MARTINS et al., 2024). Contudo é necessário reconhecer as limitações dessa abordagem, uma vez que a simulação estática consegue fornecer somente informações corretivas do processo, um "retrato", não sendo capaz de prever a evolução temporal de variáveis importantes como o desgaste dos revestimentos pela abrasão, corrosão e impacto ou a vida útil dos componentes mecânicos.

2.3.1 O Software USIM PAC

A simulação de processos minerais, essencial para o entendimento de circuitos complexos, é operacionalizada neste estudo através do software USIM PAC (Unité de Simulation de Procédés par Calculateur). Desenvolvido originalmente pela BRGM (Bureau de Recherches Géologiques

et Minières) e distribuída pela CASPEO, esta ferramenta opera em estado estacionário (*steady-state*) e foi fundamentada com o pensamento de lidar com qualquer tipo de planta ou material representando seu fluxo fielmente. Segundo (CASPEO, 2022) Diferente de simuladores químicos convencionais, o USIM PAC estrutura-se na interdependência de quatro componentes centrais que permitem replicar digitalmente a operação da planta, sendo eles:

1 - Fluxograma (*Flowsheet Drawing*): É a base da simulação, sendo o primeiro passo para construção da planta o desenho do fluxograma utilizando os equipamentos conectados seguindo a lógica da planta com as strings (linhas) que representam os fluxos e suas direções (CASPEO, 2022).

2 - Modelo de fases (*Phase Model*): Pode ser considerado o grande diferencial do software, é uma ferramenta que permite definir as características essenciais do mineral, tornando possível detalhar não somente a composição química global, mas também suas fases mineralógicas (ex: hematita, quartzo), atribuindo-lhes propriedades físicas específicas (como densidade e susceptibilidade magnética) e distribuindo-as em classes de tamanho (distribuição granulométrica) e outros critérios de classificação, essencial para simular processos que dependem da liberação mineral (CASPEO, 2022).

3 - Modelos matemáticos (*Mathematical Models*): São as equações que regem cada equipamento e sistema de fluxo, baseados nos conhecimentos científicos sobre os mecanismos de quebra, separação, classificação ou cinética (como a lei de Bond para moagem ou modelo de Plitt para hidrociclones) calculando as transformações que os fluxos de entrada sofrem ao passar por cada unidade (CASPEO, 2022).

4 - Algoritmos de Cálculo (*Calculation Algorithms*): São ferramentas de reconciliação de dados e calibração que processam as informações dos três componentes anteriores para garantir que o balanço de massas feche. (CASPEO, 2022).

2.3.1.1 Modelagem Fenomenológica e modelos matemáticos

Quando está se modelando um sistema, é preferido utilizar a abordagem fenomenológica em detrimento da puramente empírica, pois essa busca refletir as realidades físicas do processo de fragmentação e separação, uma vez que modelos com base em princípios físicos oferece comportamentos mais confiáveis, como a cinética de quebra de Bond, facilitando mudanças para condições ainda não testadas e escalonamento de equipamentos industriais (KING, 2001).

Para modelar os equipamentos, o USIM PAC utiliza diferentes níveis de complexidade, organizando de forma hierárquica. No nível 0 (*Flowsheeting*), utilizam-se modelos de transferência simples, sem muitos parâmetros de configuração, onde o usuário especifica diretamente a performance de separação a partir de uma malha granulométrica, com o fim de facilitar a correlação com o balanço de massas fornecido, caso a planta já exista.

À medida que o projeto avança para o dimensionamento, é adotado o Nível 1, que incorpora parâmetros físicos básicos e equações de potência, como o diâmetro do moinho e o *Work Index* de Bond, o que exige uma quantidade maior de dados experimentais para prever o

consumo energético e a capacidade do equipamento. Para a otimização de plantas existentes, o objetivo central é chegar aos níveis 2 e 3 (Calibrados), que representam o estágio de maior precisão, onde parâmetros cinéticos e tempos de residência são ajustados por meio de algoritmos de Estimação de Parâmetros com base em dados operacionais reais da usina ou ensaios piloto detalhados, permitindo representar com fidelidade a dinâmica da carga circulante e a distribuição granulométrica final do produto (CASPEO, 2022).

A precisão dos modelos fenomenológicos depende da correta descrição da alimentação, uma vez que o comportamento das operações unitárias é influenciado não apenas pelo tamanho médio, mas também pela distribuição estatística das propriedades individuais das partículas. No processamento de itabiritos, a função de distribuição de tamanho $P(d_p)$, que define a fração de massa acumulada passante em um diâmetro d_p , é a ferramenta primária para descrever as populações de partículas no simulador (KING, 2001)

Para representar matematicamente o ROM e os produtos das etapas de cominuição, o USIM PAC emprega funções de distribuição ajustáveis que capturam a assinatura da fragmentação. A distribuição de Rosin-Rammler é amplamente utilizada pela sua versatilidade em ajustar dados de moagem, sendo definida pela equação:

$$P(D) = 1 - \exp[-(D/D_{63.2})^\alpha] \quad (2.1)$$

Onde o parâmetro de escala $D_{63.2}$ representa o tamanho de referência e o parâmetro de forma α indica a dispersão ou a largura da distribuição em que valores mais altos indicam uma distribuição mais estreita e uniforme.

Já para produtos da britagem, o software frequentemente recorre a distribuição Log-Normal, que possui forte embasamento teórico no teorema de Kolmogorov. Este teorema postula que se uma partícula e seus fragmentos forem quebrados sucessiva e aleatoriamente, a distribuição resultante tende estatisticamente a esse perfil, sendo descrita pela média geométrica e pelo desvio padrão da população (KING, 2001).

E para a modelagem de equipamentos de classificação, como os hidrociclones, a função Logística é preferida para representar a curva de partição (curva de Tromp) que permite ajustes finos na nitidez de corte através do parâmetro λ , sendo essencial para prever corretamente a recuperação de finos e o by-pass de água para o underflow.

Um dos maiores desafios na modelagem de plantas existente é a inconsistência dos dados brutos industriais, onde erros de pesagem, amostragem e análises laboratoriais frequentemente resultam em balanços de massa que não fecham e para sanar esse problema o simulador utiliza o módulo de reconciliação de dados, operado pelo algoritmo BILCO. Este algoritmo aplica o método dos mínimos quadrados ponderados para ajustar as variáveis experimentais, minimizando a função objetivo J , que representa a soma dos erros quadrados ponderados pela variância de cada medida:

$$J = \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{med,i} - X_{calc,i}}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2.2)$$

$X_{med,i}$ - Valores medidos

$X_{calc,i}$ - Valores calculados

σ_i - Desvio padrão

No contexto do diagnóstico do circuito de moagem, esta etapa é vital para validar se a carga circulante de 300% observada é um fenômeno físico real ou um artefato de medição, garantindo que o modelo base para a otimização esteja ancorado em um balanço de massa matematicamente robusto antes de qualquer simulação de novos cenários.

2.4 Simulação dinâmica

Com o advento da tecnologia, integrando novas ferramentas com a inteligência artificial é nítido que a simulação estática vem perdendo espaço de protagonismo, sendo somente um caminho para a simulação dinâmica, que pode prever diferentes cenários e maneiras de atuar da melhor forma em todos eles, como por exemplo o desgaste contínuo devido abrasão em um britador. Conforme proposto por (MARTINS et al., 2024) e ilustrado na figura 2, o desenvolvimento de sistemas de controle e simulação dinâmica segue uma sequência, tendo início com os dados de engenharia e a simulação estática como é representado no fluxo da figura 2.

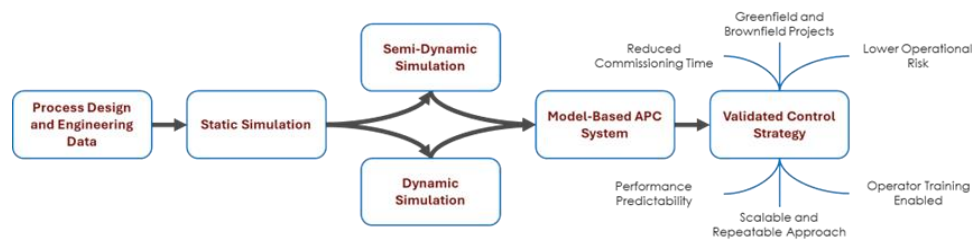


Figura 2 – Metodologia proposta para configuração antecipada via simulação integrada. Fonte: Martins et al. (2024).

Diferentemente da estática, a simulação dinâmica introduz a variável tempo nas equações do modelo, o que permite a representação fiel das relações de atraso, parada e acúmulo que ocorrem na planta real, sendo possível simular por exemplo o comportamento de tanques pulmão, a parada de fornos, o tempo de transporte em correias de longa distância e a hidráulica de sistemas de bombeamento e recirculação. Ao representar essas transições de regime, a simulação dinâmica torna-se essencial para validar como a usina reage a perturbações comuns, como variações na dureza do ROM, flutuações na vazão de alimentação ou falhas em equipamentos, permitindo antecipar gargalos que só apareceriam durante a operação física.

A principal aplicação estratégica desta etapa, conforme destacado por (MARTINS et al., 2024), é a validação de sistemas de Controle Avançado de Processos (APC) em ambiente virtual. Ao conectar o simulador dinâmico às lógicas de controle, cria-se um ambiente seguro para testar

estratégias, malhas de controle PID, intertravamentos e sistemas de proteção, permitindo que os engenheiros verifiquem se as estratégias de controle de nível de caixas, densidade de polpa e carga circulante são funcionais para estabilizar o processo antes mesmo de o software ser carregado nos CLPs da planta, reduzindo drasticamente o tempo de comissionamento e a necessidade de ajustes empíricos no campo.

Além da engenharia de controle, a simulação dinâmica desempenha um papel crucial na capacitação de recursos humanos através de sistemas de Treinamento de Operadores (OTS - Operator Training Simulator). O modelo dinâmico calibrado funciona como um "simulador de voo" para a usina, permitindo que operadores treinem procedimentos de partida (start-up), parada e resposta a emergências em um ambiente virtual realista. Adicionalmente, esta tecnologia habilita o uso de "sensores virtuais" (soft sensors), que utilizam os modelos físicos para estimar em tempo real variáveis difíceis de medir fisicamente, como a distribuição granulométrica interna do moinho ou a liberação mineral, elevando o patamar de inteligência operacional da unidade.

Embora a simulação dinâmica esteja fora do escopo deste estudo, é fundamental compreender que a construção de um modelo estático sólido e bem calibrado no USIM PAC é o pré-requisito indispensável para alimentar essa etapa futura. A simulação estática fornece a parametrização física, as curvas de partição e os balanços de massa fundamentais sobre os quais os comportamentos dinâmicos serão posteriormente modelados, servindo como a base física robusta necessária para qualquer estratégia subsequente de otimização e controle avançado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Construção do fluxograma e calibração do Modelo 0

A construção do fluxograma da planta no USIM PAC foi estruturada, inicialmente, com os modelos de Nível 0 (*flowsheeting*), os quais permitem especificar diretamente o nível de desempenho dos equipamentos sem a necessidade de modificar suas dimensões físicas ou taxas de alimentação, sendo ideais para consolidar o balanço de massa. Essa definição de nível é feita de forma simples, clicando no número referente ao equipamento e escolhendo o modelo na barra de seleção.

O primeiro passo para construir a simulação é desenhar o fluxograma, mimetizando o fluxograma de engenharia da empresa, conforme apresentado na Figura 3, a fim de representar os processos. Os equipamentos menos relevantes foram, em sua maioria, retirados da simulação (bombas, correias, caixas e silos) para manter o foco somente onde o fluxo sofreria mudanças de granulometria, teor e taxa.

Com a planta replicada no USIM PAC, é necessário definir o modelo de fases (*Phase Model*), etapa fundamental que define a identidade do material e determina como o fluxo será transformado e separado ao longo da passagem pelos equipamentos, por meio da divisão em faixas granulométricas e da definição de densidades de cada componente do bem mineral. Inicialmente, são adicionadas as fases *Ore* e *Water*, com o *mass flowrate* em t/h e o *volumetric flowrate* em m^3/h . Em seguida, define-se a malha granulométrica das fases (*particle sizes*), adicionando as faixas de peneiras de maior relevância, iniciando com $1\mu m$, que representa a lama mais fina, até o *topsize* de 1060 mm.

Primeiramente, é inserido o ROM. É importante ressaltar que ele é o único dado do material que será personalizado; o restante dos fluxos será calculado automaticamente no decorrer da simulação. Por ser a primeira taxa, é necessário distribuí-la por faixas granulométricas e por quantidade de cada elemento. No caso estudado, foi utilizada uma malha de $1\mu m$ a 1060 mm, assim como no modelo de fases, e o D_{80} em 93,7 mm, com a porcentagem de hematita (Fe_2O_3), convertida em percentual de ferro (48,2%), sílica (SiO_2) com 22,5% e ganga em aproximadamente 8,14%. A construção da curva granulométrica de alimentação da usina foi realizada com base em dados amostrais do material e nos percentuais retidos esperados nas grelhas e peneiras, conforme representado na Figura 4.

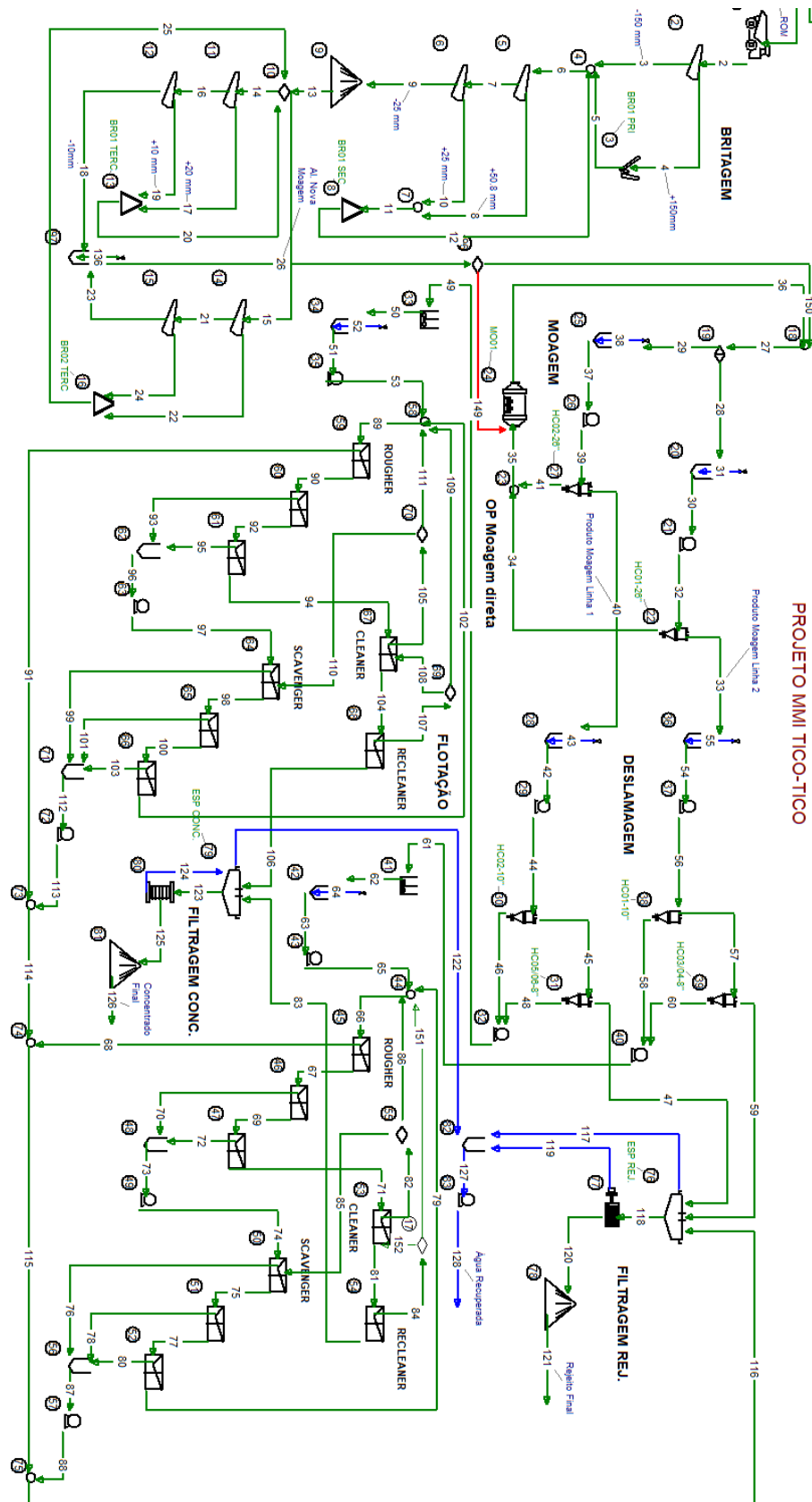


Figura 3 – Réplica do fluxograma de engenharia da Mineradora de Ferro no USIM PAC. Fonte: Autor.

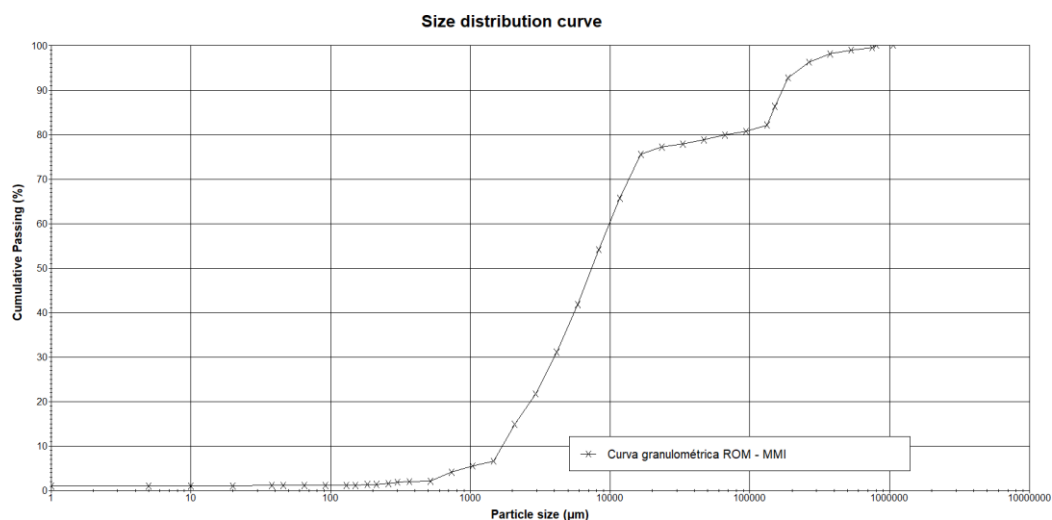


Figura 4 – Curva granulométrica do ROM. Fonte: Autor.

com taxa de 1444,00 t/h é direcionado a uma grelha de barras que no simulador está representado pelo modelo Screen (0) na Figura 5, com a eficiência de peneiramento fixada em 98% a fim de simular o comportamento de uma grelha na remoção de finos. O material retido alimenta o britador de mandíbulas, enquanto o passante une-se ao produto britado em um módulo de mistura (Mixer) para seguir ao próximo estágio.

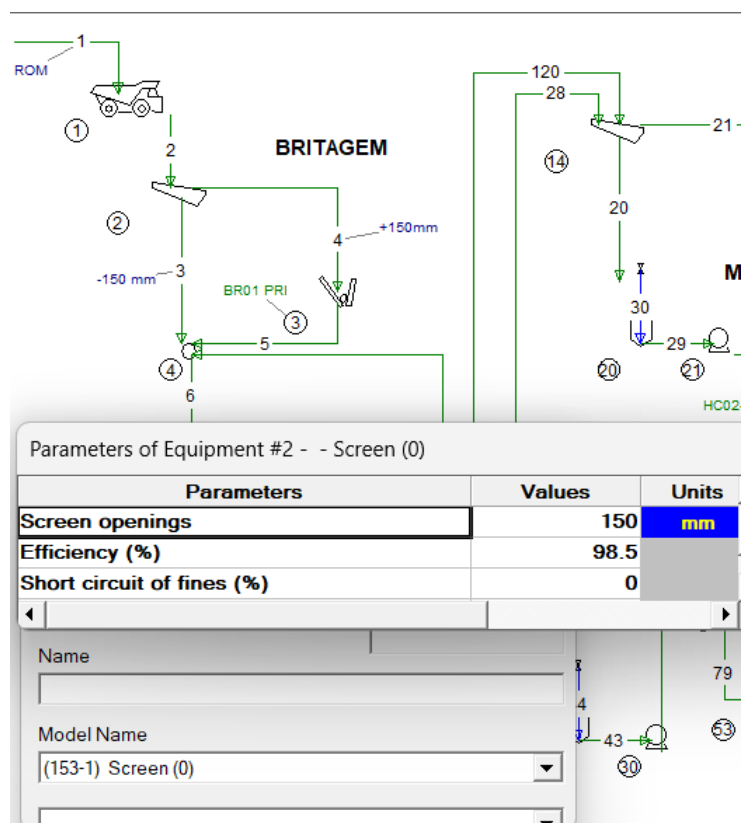


Figura 5 – Britagem e peneiramento primários – Modelo 0. Fonte: Autor.

O fluxo saindo do mixer é classificado em duas peneiras double Deck, que também foi calibrado para o modelo Screen 0A com abertura de 50,8 mm, em que o oversize é direcionado para um britador cônico secundário que opera em circuito fechado, garantindo a granulometria de transferência para a Pilha de recebimento.

Já o produto acumulado na Pilha é direcionado para um novo mixer pelo fluxo 13, que alimenta uma dupla de peneiras *double deck* com abertura de 14 mm, cujo o retido alimenta uma dupla britadores cônicos terciários, fixados no modelo *Symons Cone Crusher (0)* como representado na figura 6, que também trabalham em circuito fechado com o peneiramento. Ao final, o passante do peneiramento secundário segue para a pilha pulmão da moagem. Nesse momento a taxa da planta troca para aproximadamente 83% do ROM, para suprir a alimentação da via úmida.

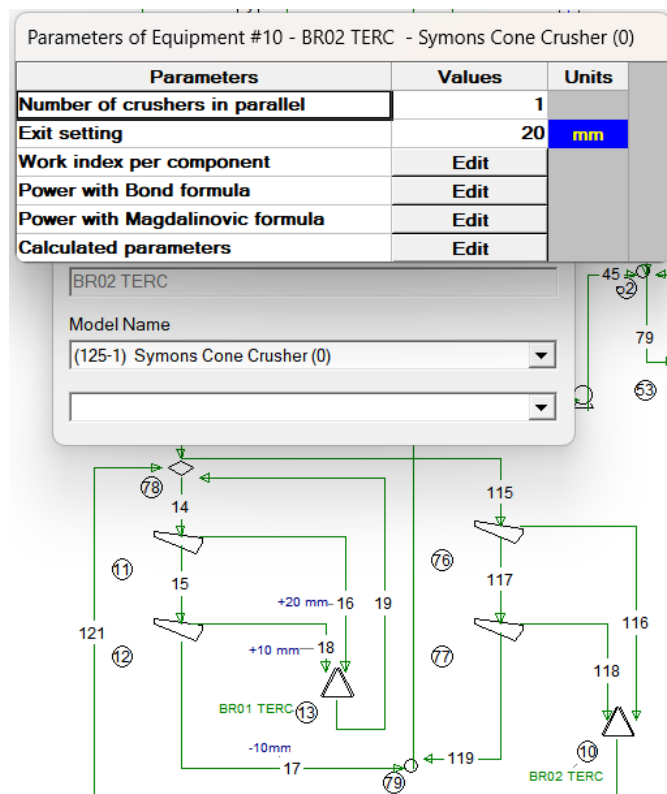


Figura 6 – Britagem e peneiramento terciários – Modelo 0. Fonte: Autor.

Com a taxa de 1200 t/h, Inicialmente na moagem, o material passa por uma peneira de proteção, que tem como objetivo a remoção das frações mais grossas e fechar o circuito e adequar a granulometria para a moagem. O minério segue para caixas de bomba (Sump), onde, com a inserção de água, no modelo Density Regulator 0, é possível controlar o percentual de sólidos em 63%, que é uma regulagem extremamente importante para o moinho pois garante reologia ideal para a liberação dentro do equipamento. O fluxo segue então para dois hidrociclones configurados no modelo Hydrocyclone 0A, representados na figura 7, onde o *underflow* faz a alimentação reversa do moinho de bolas e o *overflow* segue para a deslamagem. Nesse modelo de Hidrociclone

existe uma gama de variáveis que permitem o cálculo de vazão e distribuição granulométricas para atingir o balanço de massa real, como o D_{50} fixado em $99\mu m$ e o Bypass em 25%.

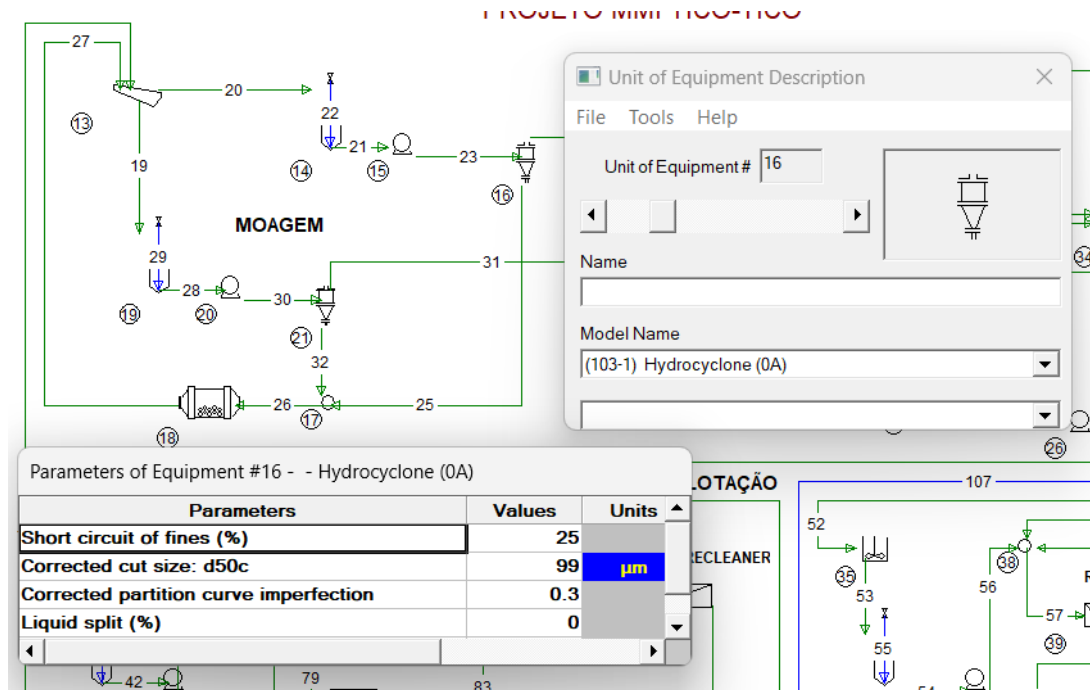


Figura 7 – Classificação da moagem – Modelo 0. Fonte: Autor.

A alimentação nova juntamente com a carga circulante, proveniente do *underflow* da classificação compõem a alimentação total do moinho de bolas, que foi alocado para o modelo Mill (0A), que tem suas características mostradas na figura 8. Este modelo se comporta como um transformador granulométrico, onde a curva de distribuição é calculada a partir da função de distribuição de Rosin-Rammler. Neste caso a variação das características exige a definição de três parâmetros fundamentais de controle do moinho, sendo eles:

O (*Product particle size distribution slope*), que refere-se ao modo de cálculo da inclinação e pode ser configurado como "Calculado" (*Calculated*) ou "Fixo" (*Fixed*). Se configurado como calculado, o modelo realiza uma regressão linear tentando acompanhar a curva de alimentação. No entanto, como o objetivo era gerar o ROM do zero simulando, o parâmetro foi ajustado para "Fixo" em 1.2.

O (*Slope of the Rosin-Rammler distribution*) que é índice de dispersão onde valores mais altos geram curvas estreitas (material de tamanho uniforme), enquanto valores mais baixos geram curvas mais espalhadas, refletindo uma alta produção de finos natural da fragmentação primária.

E o D_{80} fixado em $226,15\mu m$, obtido a partir de um valor teórico para a etapa e tentativa e erro a partir desse valor, observando os resultados da amostragem realizada pela empresa.

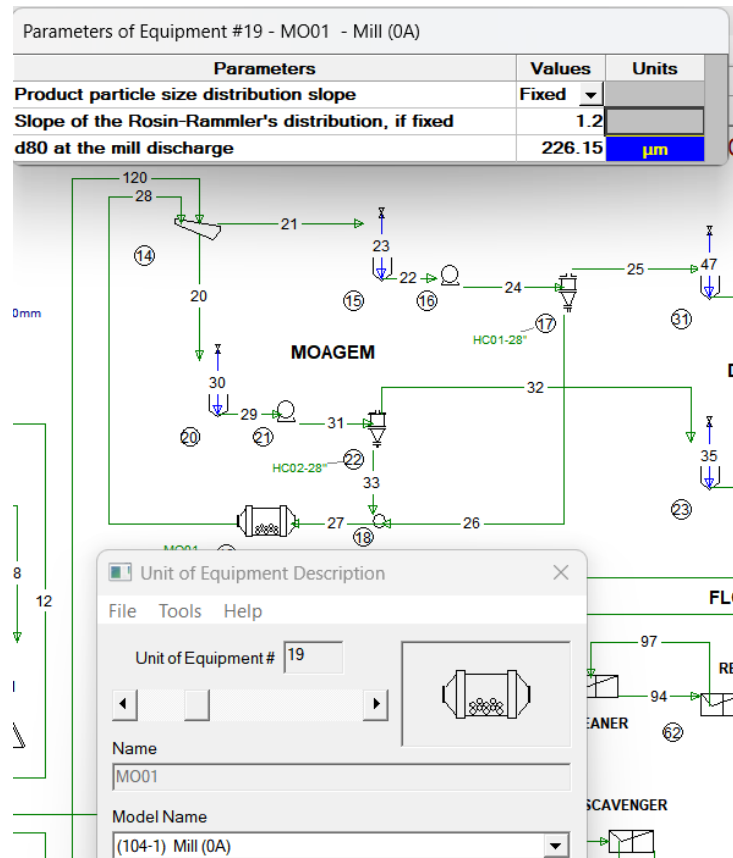


Figura 8 – Moagem – Modelo 0. Fonte: Autor.

Após a classificação na moagem, o overflow dos hidrociclones com vazão de 1200 t/h, alimenta a etapa da deslamagem que segue em duas baterias gêmeas, portanto será retratado somente uma bateria no trabalho. A remoção dos Ultrafinos ($< 10\mu\text{m}$) ocorre em um arranjo de dois estágios em série, onde o primeiro estágio, com D_{50} fixado em $26\mu\text{m}$, recebe a alimentação de sólidos e direciona a maior parte do material grosseiro para o condicionamento da flotação com taxa, somando as duas baterias de aproximadamente 952 t/h. Já o *overflow* com 13,65% de sólidos e taxa de 240 t/h segue para o segundo estágio, que tem por objetivo recuperar uma parcela de hematitas ultrafinas que foram arrastadas; Esse objetivo é alcançado com o D_{50} em 16, $4\mu\text{m}$, recuperando 144 t/h de material que se soma ao produto do primeiro estágio formando a alimentação nova da flotação com 1104 t/h e o percentual de sólidos da polpa ajustada para 65,13%, enquanto o overflow segue para o espessador de rejeitos.

A alimentação nova inicialmente é direcionada juntamente com a carga circulante, composta pelo rejeito Cleaner e o concentrado Scavenger 3, para um modelo de mixer, que tem o fim de homogeneizar o fluxo antes de seguir para a etapa Rougher. Todas as células de flotação de cada etapa (Rougher, cleaner, recleaner e scavenger) receberam o modelo Flotation (0A), que opera por meio da Recuperação por Fase Mineralógica (Ri) e da porcentagem de água na espuma, isto é, cada composto mineralógico adicionado no modelo de fases é ajustado para recuperar uma porcentagem x e a espuma com 50% de água em cada célula. Para reproduzir a seletividade da flotação catiônica reversa adotada, configurou-se o modelo para direcionar uma alta recuperação

da fase Sílica na espuma, simulando a ação eficiente do coletor (amina) sobre o quartzo, enquanto a fase Hematita teve sua recuperação definida preferencialmente para o fluxo de afundado, como é possível analisar na figura 9 que dá destaque para as porcentagens de recuperação. O refinamento desses parâmetros em cada banco foi realizado através de um processo iterativo, ajustando-se as recuperações até que os teores das correntes intermediárias e do concentrado final na simulação convergissem com os dados analíticos do balanço de massas fornecido.

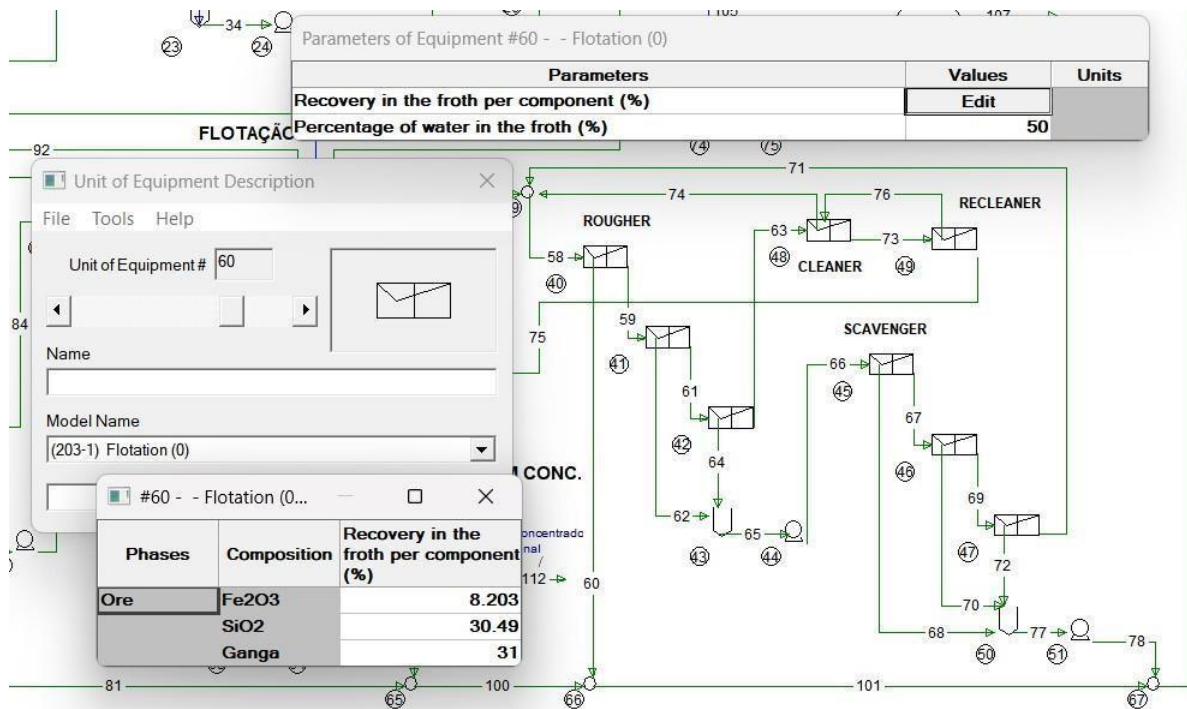


Figura 9 – Flotação – Modelo 0. Fonte : Autor

Por fim o curso chega no espessamento e na filtragem, que segue em duas linhas diferentes, para a produção do *Pellet feed* e o rejeito final, ambas projetadas para maximizar a recuperação de água de processo e garantir a estabilidade geotécnica do rejeito descartado. nessa fase todos os 4 equipamentos (Espessador de concentrado e de rejeito e Filtro de concentrado e de rejeito) são caracterizados no modelo Solid/liquid Separator (0), evidenciado na figura 10, que tem como principal característica a regulação de sólidos na polpa, fechando os dados da planta com o concentrado em 10% de umidade e o rejeito com 16%.

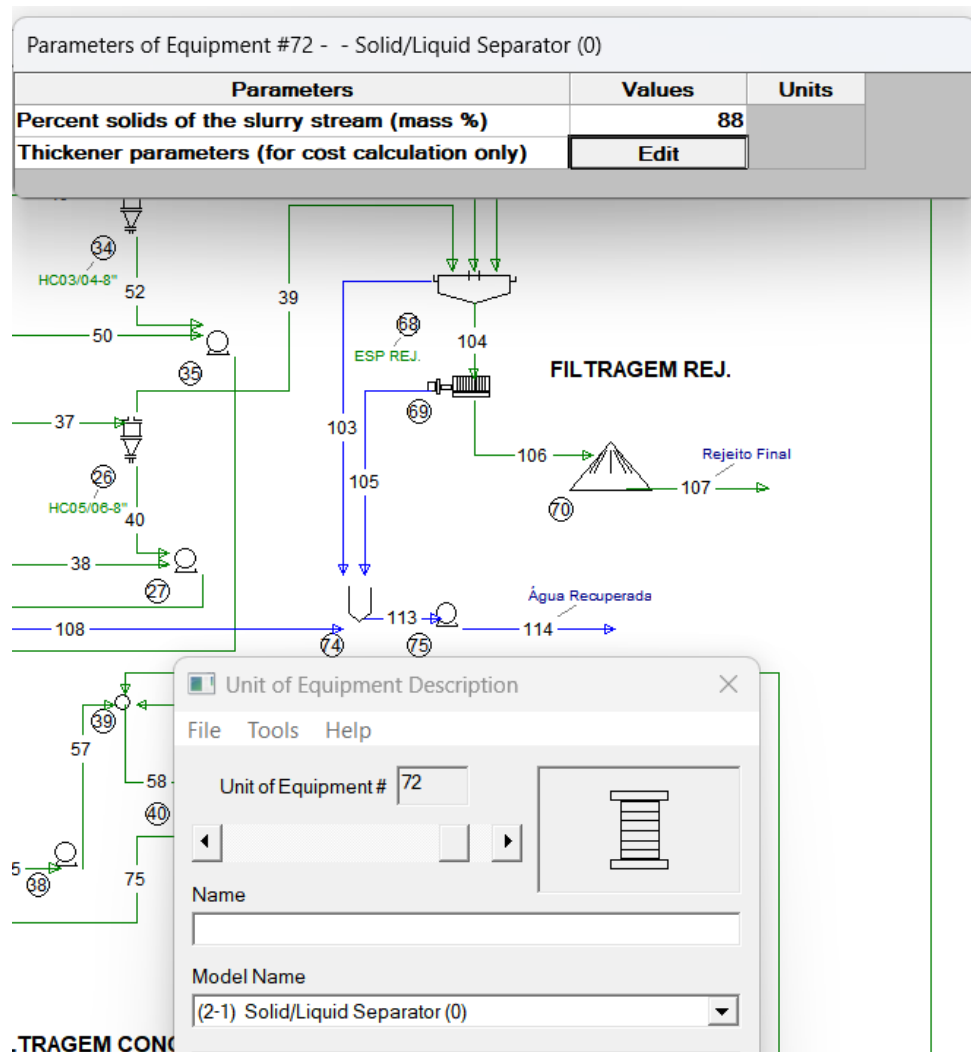


Figura 10 – Espessamento e filtragem. Fonte: Autor.

3.2 Refinamento dos modelos: Transição para os níveis 1 e 2

Após a consolidação do balanço de massas e água da planta através dos Modelos de Nível 0, a etapa final da metodologia consistiu na elevação do nível de detalhamento de equipamentos críticos para modelos de Nível 1 (Dimensional) e Nível 2 (Cinético/Fenomenológico). Enquanto os modelos de Nível 0 são funções de transferência que impõem uma performance fixa para fechar o balanço, os modelos mais avançados calculam o desempenho do equipamento por meio de suas dimensões, parâmetros operacionais e nas propriedades do minério. Essa estratégia tem por objetivo transformar o balanço de massas em uma simulação de processos, tornando possível visualizar o comportamento da planta e do material com a mudança na taxa de alimentação e teor e validar se os equipamentos dimensionados possuem capacidade e potência instalada para atingir as metas de produção.

Para representação do avanço de fase serão analisados o equipamento inicial na britagem primária, o britador de mandíbulas, que do Modelo Jaw Crusher (0) foi substituído pelo Jaw

Crusher (1) e a Linha de Flotação passando para o modelo Flotation (2B) que foi calibrado por meio da retrosimulação, utilizando o modelo 0.

Diferentemente do modelo anterior de britador, que possibilita somente uma curva granulométrica de saída fixa, o modelo *Jaw Crusher* (1), calcula a distribuição do tamanho do produto e a potência com base na posição da abertura fechada (CSS) e na resistência do minério e utilizando uma série de inputs para calcular a potência pela fórmula de Bond e a capacidade por meio de uma formula derivada de Ch. Bouche (CASPEO, 2022a).

$$P = 10BW_iQ\left(\sqrt{\frac{1}{P_{80}}} - \sqrt{\frac{1}{F_{80}}}\right) \quad (3.1)$$

- W_i - Índice de trabalho de Bond;
- Q - Vazão de alimentação;
- P_{80} - D_{80} do produto;
- F_{80} - D_{80} da alimentação;
- B - Parâmetro de ajuste da fórmula de Bond. Valor padrão: 1;
- A - Parâmetro de ajuste da fórmula de Magdalinovic. Valor padrão: 105;
- n - Parâmetro de ajuste da fórmula de Magdalinovic. Valor padrão: 0,5.

Como representado na figura 11 é possível dividir em 3 principais parâmetros a serem adicionados para configuração do modelo, sendo elas: O número de britadores em paralelo, a abertura na posição fechada (*Exit setting*) e o W_i por componente que para esse caso do britador primário foi adicionado o mesmo para todos os componentes, já que nessa fase as partículas estão majoritariamente msitas, sendo mais prudente colocar o valor médio dos três componentes.

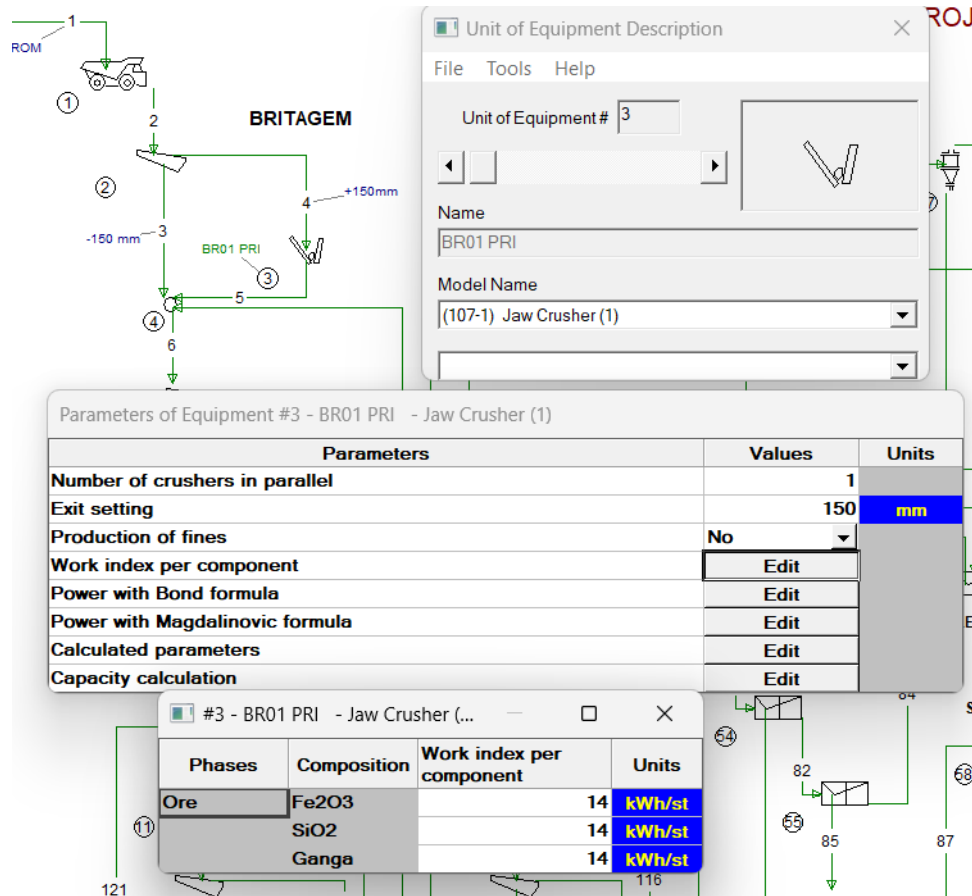


Figura 11 – Jaw Crusher (1). Fonte: Autor.

Agora como referência de equipamento calibrado para o Nível 2, as células de flotação foram configuradas individualmente no modelo Flotation (2B), mostrado na Figura 12, que vai além da divisão de fluxos, simulando o processo como um fenômeno cinético. De acordo com a documentação técnica (CASPEO, 2022b), a lógica do algoritmo r é baseada na segmentação de cada tipo de partícula i em duas categorias comportamentais diferentes: uma fração flotável e outra não flutuante parametrizada pela recuperação máxima possível (R_{∞}).

Para determinar a velocidade do processo, o modelo emprega a Fórmula de King para calcular a constante cinética (K_{ij}) específica para cada classe de tamanho j , descrevendo a probabilidade de colisão e adesão bolha-partícula em função do tamanho:

$$K_{ij} = \alpha_i \cdot \left(\frac{d_i}{d_{opt,i}} \right) \cdot \exp\left(1 - \frac{d_i}{d_{opt,i}}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{d_i - d_{opt,i}}{d_{max,i} - d_{opt,i}}\right)^2\right]^2 \cdot R_{\infty,i}^2 \quad (3.2)$$

- α_i : Parâmetro de ajuste para o tipo de partícula i ;
- d_j : Tamanho médio da classe de tamanho j ;
- $d_{max,i}$: Máximo tamanho de partícula flutuável;
- $d_{opt,i}$: Tamanho de partícula de flotação mais fácil;

- $R_{\infty,i}$: Recuperação máxima possível do tipo i.

Com base nesta constante e assumindo que cada célula opera como um misturador perfeito, a vazão mássica de concentrado ($Q_{c,i,j}$) é calculada em função da alimentação ($Q_{f,i,j}$) e do tempo médio de residência (τ).

$$Q_{c,i,j} = Q_{f,i,j} \cdot \frac{k_{ij} \cdot \tau \cdot R_{\infty,i}}{1 + k_{ij} \cdot \tau} \quad (3.3)$$

- $Q_{c,i,j}$: Vazão de partículas no concentrado;
- $Q_{f,i,j}$: Vazão de partículas na alimentação;
- $R_{\infty,i}$: Recuperação máxima do tipo i;
- k_{ij} : Constante cinética calculada acima;
- τ : Tempo médio de residência.

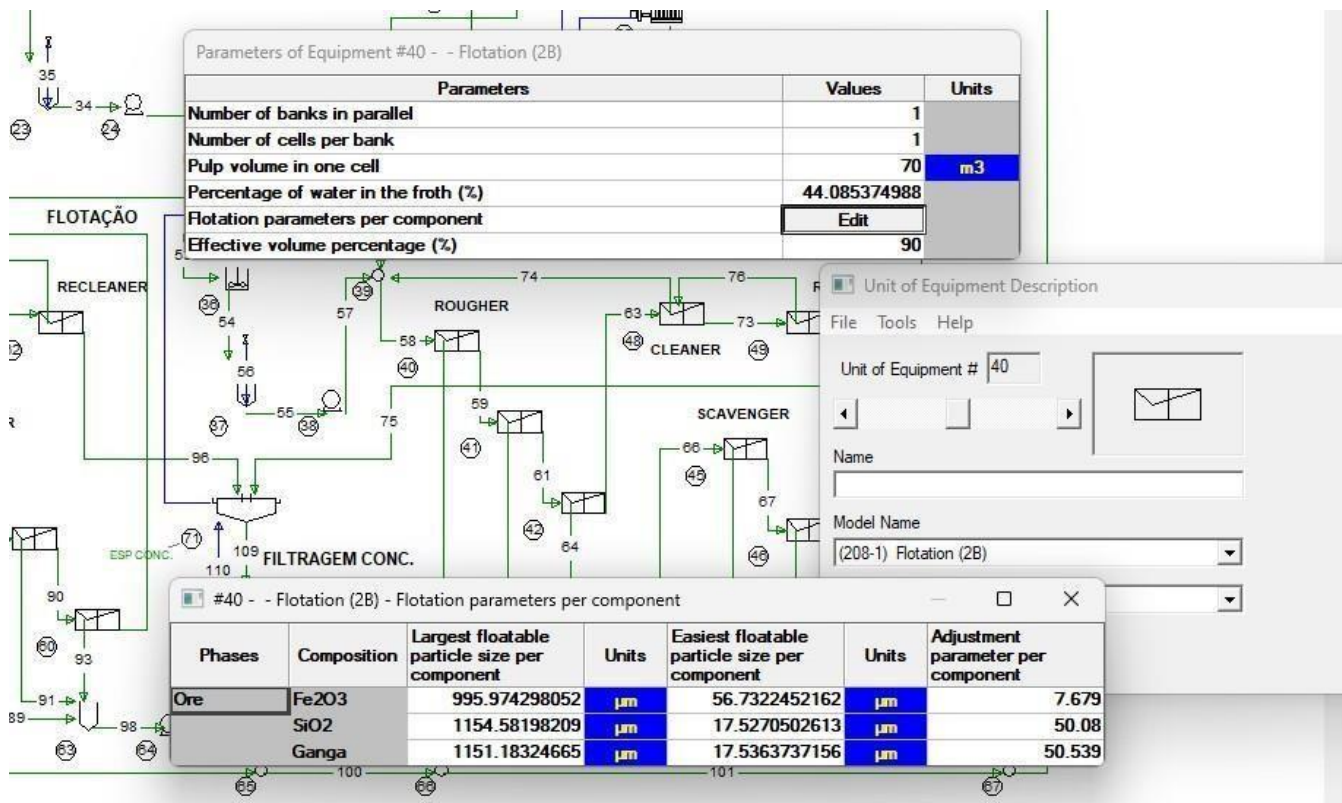


Figura 12 – Flotation (2B). Fonte: Autor.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio da simulação estática global da unidade de tratamento analisada, bem como a validação do modelo frente aos dados de amostragem industrial, com foco na aderência entre os valores medidos e os valores simulados no software USIM PAC. Dessa forma, garante-se a confiabilidade do balanço de massa e metalúrgico para fins de diagnóstico e otimização.

4.1 Validação granulométrica do circuito

Primeiramente, foi feita a conferência das curvas granulométricas dos principais fluxos da planta, conforme apresentado na Figura 13. As curvas são geradas pelo USIM PAC, e o D_{80} de cada fluxo está representado no gráfico pelos círculos vermelhos. As curvas escolhidas para análise foram, respectivamente, as do ROM, da alimentação da moagem, do rejeito final, do concentrado final, do produto da deslamagem e da alimentação da flotação, determinadas a partir da localização do D_{80} .

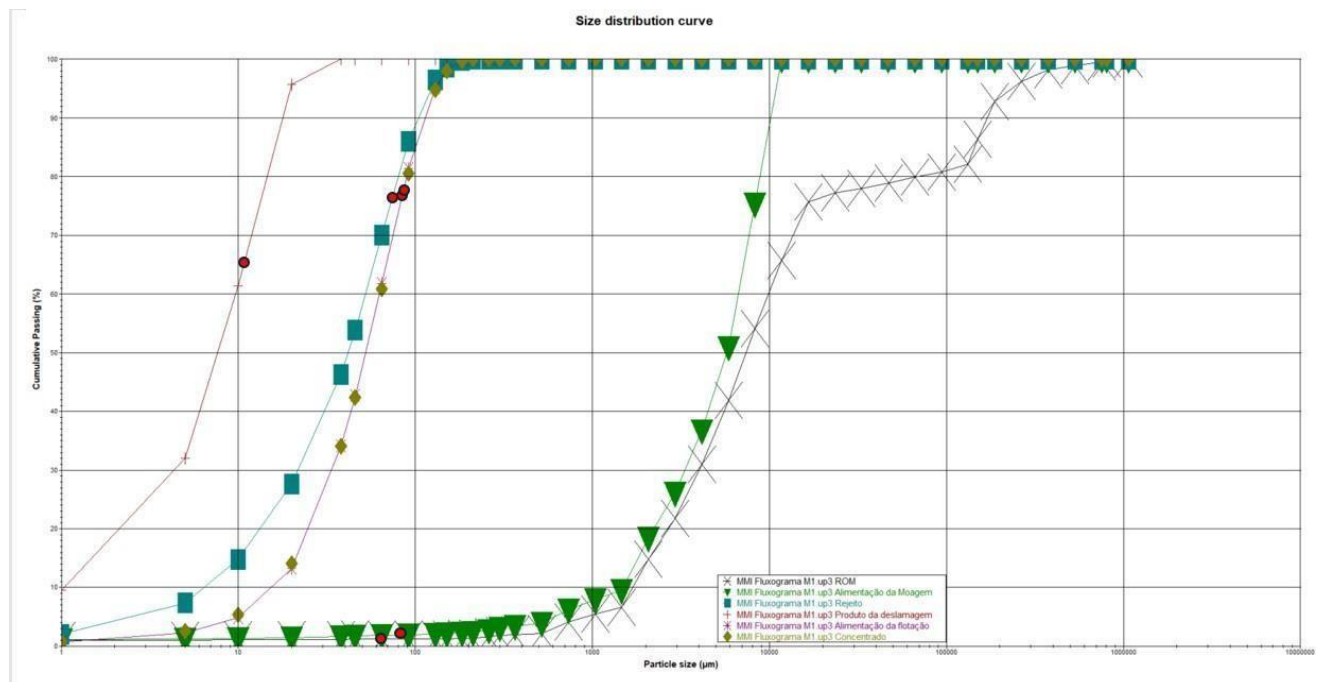


Figura 13 – Curvas granulométricas e relação com D_{80} . Fonte: Autor.

4.2 Comparativo medido vs. simulado: vazão, teor e sólidos

A comparação de resultados e o cálculo da aderência entre eles é uma das melhores formas de validar os dados obtidos e confirmar a eficiência do modelo e do software, que muitas vezes acaba sendo substituída pela amostragem manual.

Para isso, foram estruturados gráficos de sobreposição, comparando os resultados simulados com os reais e calculando a aderência média do modelo. Como mostra a Figura 14, a vazão mássica (t/h) do modelo demonstrou estabilidade e aderência média de 99,1948%, confirmando a consistência da simulação com o balanço de massa de sólidos fornecido pela empresa.

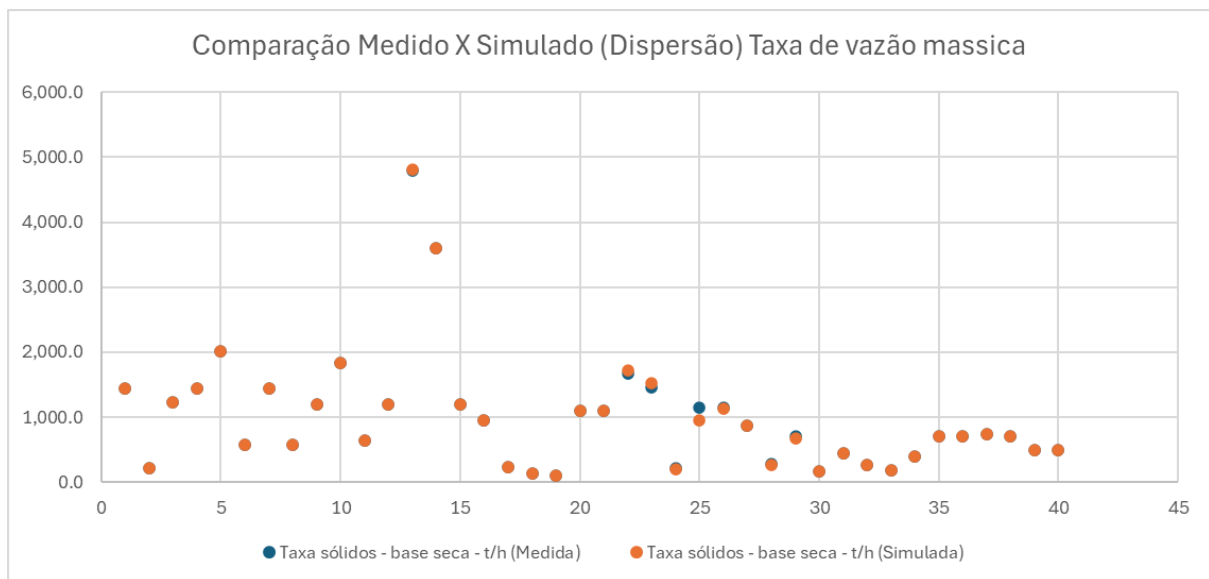


Figura 14 – Gráfico de dispersão da taxa (t/h) medida vs. simulada. Fonte: Autor.

Já no gráfico de dispersão da Figura 15, foram utilizados os dados de % de sólidos que, assim como na comparação anterior, mostraram forte aderência, porém com algumas ressalvas. Essas ressalvas são evidenciadas pela baixa correlação em alguns pontos, o que acaba reduzindo a aderência média. Um desses pontos refere-se ao passante do peneiramento secundário, que, na planilha de amostragem, é apresentado como 50%, enquanto o USIM PAC fornece o valor de 93,5% isso pois a água de lavagem do peneiramento foi desconsiderada no modelo uma vez que não é constante. Mesmo com essas pequenas divergências, o gráfico de sobreposição evidencia a eficácia das unidades de regulação de água na simulação (sumps), mantendo a densidade de polpa nos níveis exigidos para a flotação catiônica reversa.

Ressalta-se que, no fluxograma do USIM PAC, foram inseridos apenas os reguladores de água (sumps) essenciais tanto para o modelo quanto para a planta, uma vez que o controle do percentual de sólidos é indispensável. Esses reguladores foram alocados: (i) na classificação da moagem, para garantir o funcionamento adequado dos hidrociclones e melhorar a eficiência de liberação no moinho; (ii) na deslamagem, com o intuito de auxiliar o descarte de finos; e (iii) na flotação, contribuindo para o aumento da eficiência do processo.

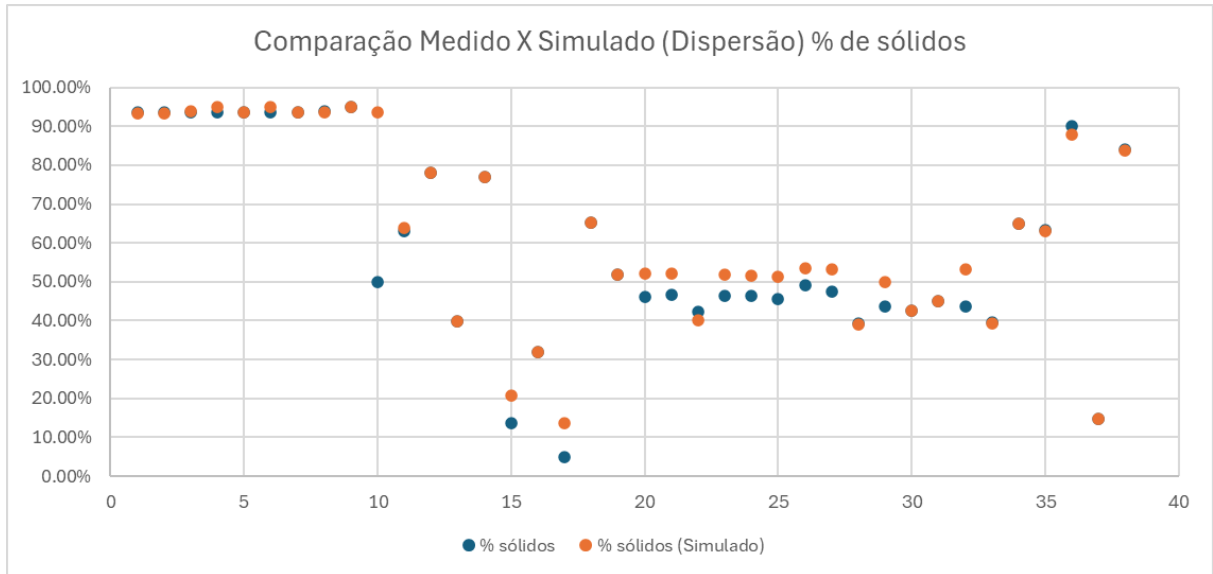


Figura 15 – Gráfico de dispersão do % de sólidos medido vs. simulado. Fonte: Autor.

A validação química comprova que a seletividade dos modelos de flotação foi efetiva. Como apresentado na Figura 16, o gráfico de teores mostra que o modelo acompanhou com precisão o enriquecimento do minério, partindo de um ROM de 47% Fe até atingir um concentrado final simulado de 66,13% Fe. A aderência média, nesse caso, ficou em 81,30800%, devido a alguns valores de teor da britagem e da cominuição não medidos.

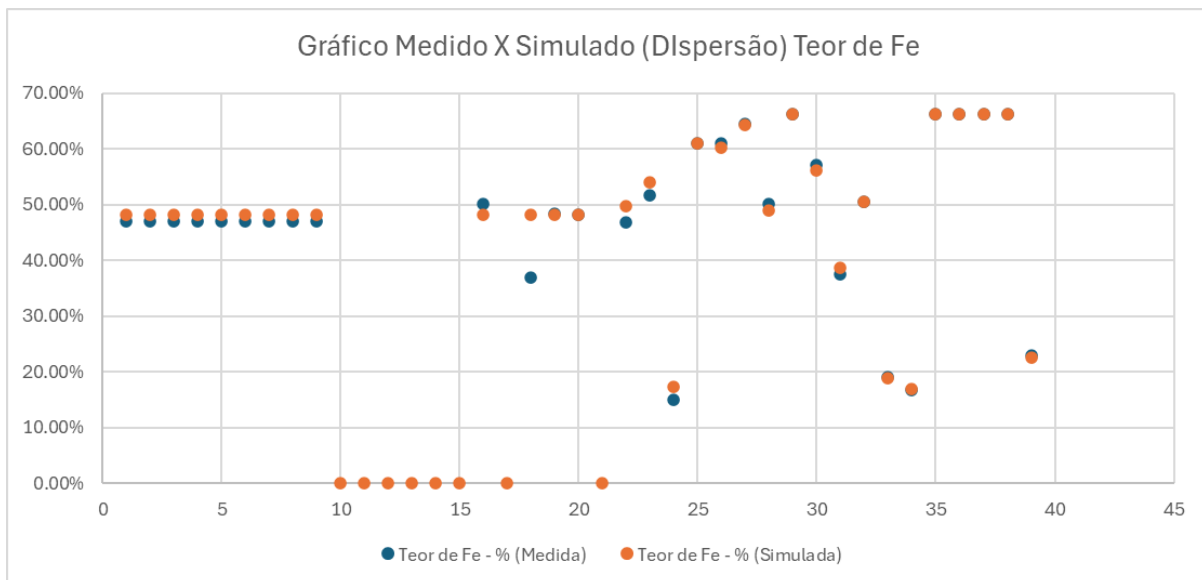


Figura 16 – Gráfico de dispersão do teor de Fe medido vs. simulado. Fonte: Autor.

Ao analisar o gráfico, é possível identificar com clareza os pontos em que não foram realizadas amostragens, evidenciados por valores tendendo a zero. Nota-se, ainda, que a dispersão dos teores apresenta comportamentos distintos ao longo do circuito.

Nas etapas de cominuição, liberação mineral e espessamento, os valores mantêm-se relativamente constantes, indicando maior estabilidade operacional e menor variabilidade composicional. Nas etapas de concentração, por sua vez, verifica-se maior variabilidade nos teores, resultado da amostragem simultânea de correntes de concentrado e de rejeito, o que naturalmente amplia a dispersão dos dados em função da eficiência de separação do processo.

4.3 Análise da recuperação mássica e metalúrgica

A avaliação de desempenho de uma usina de beneficiamento é baseada, fundamentalmente, em dois indicadores: a recuperação mássica e a recuperação metalúrgica. Enquanto a recuperação mássica indica a fração da massa total de minério alimentado que foi convertida em produto final, a recuperação metalúrgica expressa a eficiência do processo em extrair o elemento de interesse e direcioná-lo ao concentrado, evitando perdas para o rejeito.

Para a análise das recuperações e a comparação com a planta simulada, foram utilizadas as seguintes equações gerais de balanço:

Recuperação mássica (R_m):

$$R_m = \left(\frac{M_c}{M_a} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

- R_m – Recuperação mássica
- M_c – Massa de concentrado
- M_a – Massa da alimentação

Recuperação metalúrgica (R_{met}):

$$R_{met} = \left(\frac{M_c T_c}{M_a T_a} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

- R_{met} – Recuperação metalúrgica
- M_c – Massa do concentrado
- M_a – Massa da alimentação
- T_c – Teor de concentrado
- T_a – Teor da alimentação

O cálculo do balanço global da planta real, em comparação com a planta simulada, foi feito considerando o ROM e o *pellet feed*. Os resultados foram plotados em um gráfico de barras na Figura 17 para efeito de comparação. Mesmo com um pequeno desvio na recuperação metalúrgica, os resultados seguem próximos, corroborando a utilização da simulação.

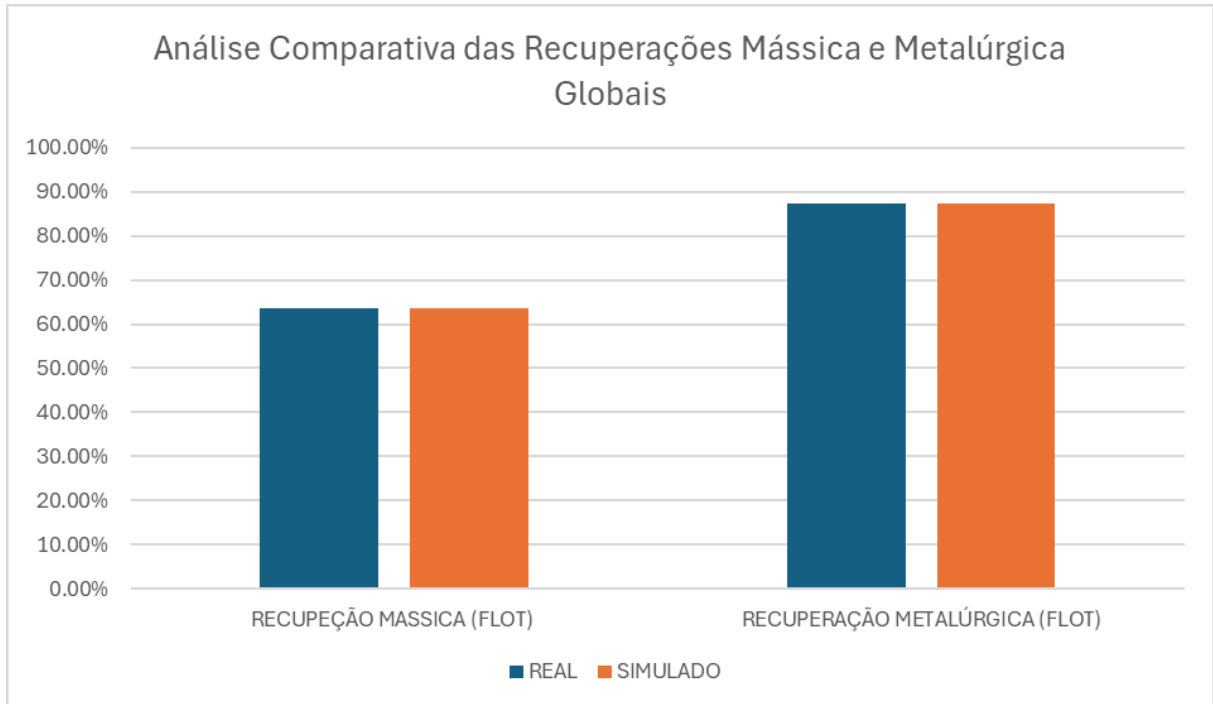


Figura 17 – Comparação da recuperação metalúrgica e mássica global: real vs. simulado. Fonte: Autor.

Além da avaliação global, é imprescindível calcular isoladamente o desempenho da etapa de flotação. Por ser a operação unitária de concentração da usina, a flotação é o processo mais sensível à variabilidade da alimentação e o principal responsável pelo teor, tanto do produto final quanto do rejeito final.

Para o circuito de flotação, as recuperações mássica (R_{mflot}) e metalúrgica ($R_{metflot}$) são calculadas considerando exclusivamente a alimentação nova, que corresponde ao *underflow* dos hidrociclones e ao concentrado da etapa *Recleaner*.

A comparação detalhada entre os dados medidos na amostragem industrial e os resultados gerados pela simulação para o circuito de concentração está sumarizada na Figura 18.

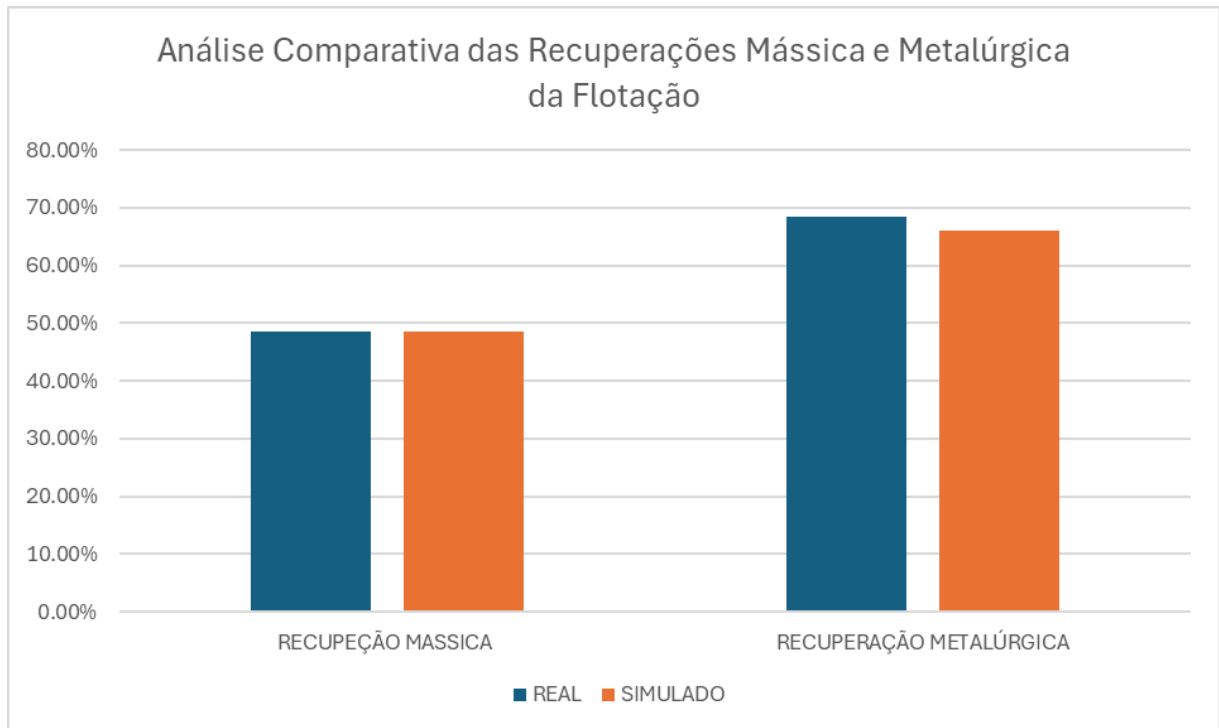


Figura 18 – Comparação da recuperação metalúrgica e mássica da flotação: real vs. simulado.
Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu consolidar a simulação computacional como uma ferramenta indispensável para a engenharia de processos minerais, validando o fluxograma de beneficiamento da mineradora estudada através do software USIM PAC. A metodologia adotada, que evoluiu de uma simulação estática de balanço de massas (Nível 0) para uma modelagem preditiva fenomenológica (Níveis 1 e 2), demonstrou ser eficaz para garantir não apenas a consistência dos fluxos de sólidos e água, mas também para prever o comportamento operacional dos equipamentos frente às características do itabirito processado.

A etapa inicial de modelagem (Nível 0) foi fundamental para o fechamento do balanço hídrico e de massas global. A simulação confirmou que o circuito é capaz de processar a alimentação de 1444,4, atingindo as metas de produção de *Pellet Feed* com teor de ferro de 66,2% e recuperação mássica global próxima a 58,5%. Além disso, a modelagem dos espessadores e filtros permitiu quantificar a demanda de água de reposição e controlar a % de sólidos dos produtos finais, validando a sustentabilidade hídrica do circuito.

A calibração da simulação para os Níveis 1 e 2 elevou a qualidade técnica do estudo possibilitando com que na cominuição, a aplicação do modelo dimensional Jaw Crusher 1 permitisse verificar a adequação da câmara de britagem e da potência instalada frente ao Work Index do minério, garantindo que a redução granulométrica ocorra sem gargalos operacionais. E na etapa de concentração, a transição para o modelo cinético Flotation 2B garantiu maior fidelidade a planta real ao utilizar a abordagem de subpopulações de flotabilidade e cinética, tornando possível simulação dos resultados metalúrgicos reais das células, onde a recuperação não é um valor fixo, mas uma função dinâmica do tempo de residência e da distribuição granulométrica da alimentação.

Conclui-se, portanto, que a planta virtual desenvolvida no USIM PAC reflete com alta fidelidade as condições operacionais esperadas para o projeto físico. A utilização de modelos matemáticos avançados permitiu identificar gargalos, otimizar o dimensionamento de equipamentos críticos e demonstrar que a adoção de tecnologias modernas, pode trazer ganhos expressivos para a operação. O simulador com os modelos avançados tem a função de tornar possível adicionar novas alimentações no sistema ou mesmo mudar esquematicamente rotas dentro do modelo sem prejudicar a calibração dos equipamentos, mantendo a veracidade da representação.

Este trabalho reforça que a simulação de processos não é apenas uma etapa de verificação de cálculo, mas um instrumento estratégico para a redução de riscos de investimento (CAPEX) e maximização da eficiência operacional (OPEX) na indústria mineral.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520: Informação e documentação - apresentação de citações em documentos*. Rio de Janeiro, 2002. 7 p.
- BERALDO, J. L. *Moagem de minérios: o moinho de bolas*. São Paulo: Edgard Blücher, 1987. 1
- CASPEO. *Model 107 – Jaw Crusher (1): Unit Operation Model Guide*. Orléans, França, 2022. Documentação técnica do software USIM PAC v. 3.3. 23
- CASPEO. *Model 208 – Flotation (2B): Unit Operation Model Guide*. Orléans, França, 2022. Documentação técnica do software USIM PAC v. 3.3. 24
- CASPEO. *USIM PAC: Reference Guide*. Orléans Cedex 2, França, 2022. V. 3.3. 11
- CASPEO. *USIM PAC: Starting Guide*. Orléans Cedex 2, França, 2022. Versão 3.3. 11, 12
- CHAVES, A. P. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem*. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 3. 4, 5
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. *Metalogenia do Brasil*. Brasília: CPRM, 2001. 4
- KING, R. P. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 10, 11, 12
- KLEIN, C.; DUTROW, B. *Manual of Mineral Science*. 23. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. 4
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de Minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 1, 2, 4, 5, 7, 8
- MARTINS, M. A. S. et al. Static and dynamic simulation for the design of advanced process control systems in mineral processing. *CEMI Process Optimization*, Nova Lima, 2024. 10, 13
- SILVA, R. V. G.; MARTINS, M. A. d. S. Simulação de circuitos de moagem de minério de ferro. *REM - Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 63, n. 1, p. 121–126, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rem/a/vS6gX7g7nC7zG8z6N8zGzLh/>>. 1