



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Curso de Graduação em Engenharia Química



**Análise Técnico-Econômica Comparativa entre Moinhos
Autógenos e Moinhos Convencionais no Processamento
Mineral: Estudo Baseado em Aplicações no Brasil.**

Uberlândia - MG

2025

RUAN ARTHUR DE CARVALHO

Análise Técnico-Econômica Comparativa entre Moinhos Autógenos e Moinhos Convencionais no Processamento Mineral: Estudo Baseado em Aplicações no Brasil.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Adilson José de Assis.

Uberlândia – MG

2025

RUAN ARTHUR DE CARVALHO

Análise Técnico-Econômica Comparativa entre Moinhos Autógenos e Moinhos Convencionais no Processamento Mineral: Estudo Baseado em Aplicações no Brasil.

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia Campus Santa Mônica.

Orientador: Adilson José de Assis.

Uberlândia, 05 de setembro de 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Adilson José de Assis
Orientador
Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof.^a. Dr.^a Sarah Arvelos Altino
Engenharia Química / FEQUI – UFU

Prof.^a. Dr.^a Alice Medeiros de Lima
Engenharia Química / FEQUI – UFU

RESUMO

Considerando o elevado custo da moagem na indústria mineral brasileira, este estudo avalia a viabilidade técnico-econômica de substituir um moinho autógeno (AG) por tecnologias convencionais, tais como os moinhos de bolas, de barras e SAG, em uma planta de beneficiamento de minério de ferro. A abordagem integra a estimativa de potência pelo método de Bond com a análise de custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX), atualizados para 2025. Os resultados, avaliados por meio do Valor Presente Líquido (VPL) dos custos em um horizonte de 10 anos, indicam o moinho de bolas como alternativa de melhor atratividade econômica. Observou-se que, embora o AG reduza gastos com consumíveis, o alto consumo elétrico e o maior investimento inicial tornam seu desempenho global inferior às demais opções. Conclui-se que a otimização de circuitos de cominuição no Brasil requer avaliação econômica integrada, na qual o custo de energia se mostra determinante para a competitividade do circuito.

Palavras-chave: moagem, método de Bond, CAPEX, OPEX, VPL.

ABSTRACT

Given the high cost of grinding in Brazil's mineral industry, this study assesses the techno-economic feasibility of replacing an autogenous mill (AG) with conventional technologies such as ball, rod, and SAG mills in an iron-ore beneficiation plant. The approach combines power estimation using the Bond method with capital (CAPEX) and operating (OPEX) cost analysis updated to a 2025 cost base. Results, evaluated through the Net Present Value (NPV) of costs over a ten-year horizon, indicate the ball mill as the most economically attractive option. Although the AG mill reduces spending on consumables, its higher electricity demand and greater initial investment make its overall performance inferior to the alternatives. The findings indicate that optimizing comminution circuits in Brazil requires an integrated economic assessment in which electricity cost is a decisive driver of circuit competitiveness.

Keywords: Comminution, Bond method, CAPEX, OPEX, NPV.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	INTRODUÇÃO.....	13
2.2	FUNDAMENTOS TÉCNICOS DOS MOINHOS UTILIZADOS	13
2.2.1	<i>Moinhos autógenos</i>	13
2.2.2	<i>Moinhos de bolas</i>	14
2.2.3	<i>Moinhos de barras</i>	14
2.3	COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÔMICO	14
2.3.1	<i>Consumo energético</i>	15
2.3.2	<i>CAPEX e OPEX</i>	15
2.4	METODOLOGIA DE ESTIMATIVA DE ENERGIA.....	16
2.5	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	16
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	OBJETIVO GERAL.....	18
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	METODOLOGIA	19
5	RESULTADOS.....	23
5.1	SEM APLICAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO	24
5.2	APLICAÇÃO DOS FATORES DE CORREÇÃO	27
5.3	ANÁLISE DE CUSTOS DAS ALTERNATIVAS DE MOAGEM	31
5.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	36
6	CONCLUSÃO	39
7	REFERÊNCIAS.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - WI por composição.	20
Tabela 2 - Valores de Potência estimados pelo modelo Minnovex adaptado.	23
Tabela 3 - Potência estimada por Bond para o moinho de barras.	25
Tabela 4 - Potência estimada por Bond para o moinho de bolas.	26
Tabela 5 - Potência estimada e corrigida por Bond para o moinho de barras.	28
Tabela 6 - Potência estimada e corrigida por Bond para o moinho de bolas.	29
Tabela 7 - Valores de CAPEX corrigidos por moinho.	32
Tabela 8 - Valores de OPEX corrigidos por moinho.	35
Tabela 9 - Análise Econômica Consolidada por moinho.	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação simplificada da planta.	9
Figura 2 - Comparativo entre os CAPEX.	33
Figura 3 - Comparativo entre os OPEX.	35
Figura 4: Composição do OPEX anual total.	37

1 INTRODUÇÃO

A finalidade deste trabalho é avaliar se a troca do moinho autógeno por outra tecnologia é viável sob os aspectos técnico e econômico em uma planta de minério de ferro. Diferentemente de uma avaliação puramente energética, este estudo integra indicadores de custo de capital (CAPEX), custo operacional (OPEX) e uma análise de Valor Presente Líquido (VPL) para determinar a alternativa de moagem mais vantajosa no contexto da indústria mineral brasileira.

Na planta a ser avaliada, o moinho autógeno (AG) utilizado possui 9,76 metros de diâmetro e 4,27 metros de comprimento, comportando uma carga de alimentação de 650 toneladas por hora. Este está presente em um circuito contendo um britador giratório, que reduz a granulometria da carga alimentada, e também duas peneiras, as quais retêm a fração que deve ser realimentada no moinho. As informações referentes à planta estão apresentadas no fluxograma da Figura 1.

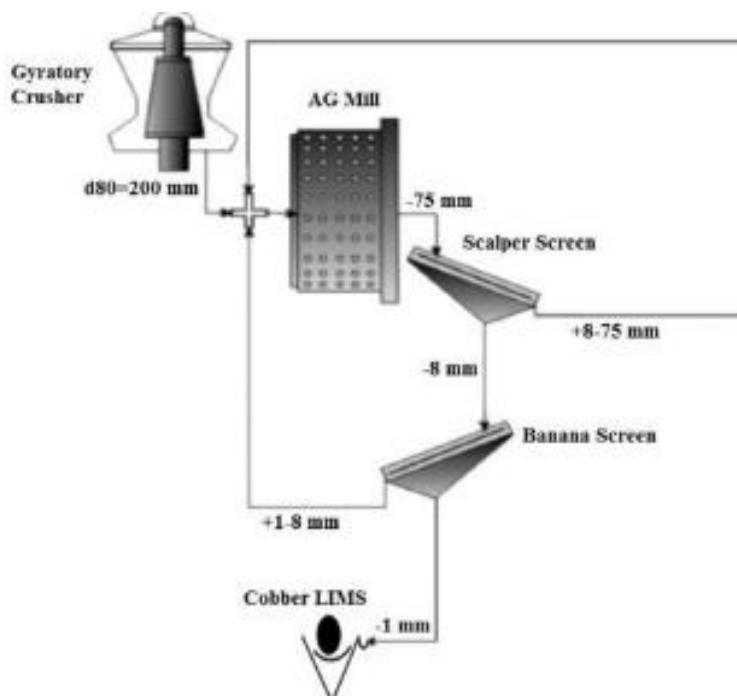


Figura 1 - Representação simplificada da planta. Fonte: Behnamfard, Roudi e Veglio (2020).

Neste trabalho, comparam-se tecnicamente e economicamente alternativas convencionais (bolas, barras e SAG) ao AG atualmente considerado. O AG é tratado como opção de simplificação de circuito por dispensar corpos moedores, cuja viabilidade depende das propriedades do fluxo alimentado e do regime operacional.

A moagem em moinhos rotativos pode ser realizada por diferentes equipamentos, destacando-se os moinhos de bolas, de barras, autógenos (AG) e semiautógenos (SAG). A escolha entre eles depende diretamente das condições operacionais, da fração granulométrica alimentada e das metas de produto. Enquanto os moinhos de bolas e barras utilizam meios moedores externos (esferas ou barras) para promover a quebra por impacto e atrito, os moinhos AG e SAG empregam o próprio minério como agente de cominuição, onde os fragmentos maiores da rocha moem os menores (METSO, 2005).

As tecnologias de moagem divergem fundamentalmente quanto ao uso de corpos moedores. Enquanto moinhos convencionais, como os de bolas e de barras, dependem de meios externos (esferas ou barras de aço) para promover a quebra do minério por impacto e atrito, os moinhos autógenos (AG) utilizam o próprio minério como agente de cominuição. Esta diferença fundamental impacta diretamente os custos operacionais (OPEX), eliminando a necessidade de consumíveis no caso do AG, mas, em contrapartida, torna sua performance altamente dos atributos do minério alimentado.

Conforme Wills e Napier-Munn (2006), a etapa de moagem representa a principal responsável tanto pelos custos quanto pela elevada carga energética no beneficiamento mineral. Dessa forma, a escolha criteriosa do tipo de moinho e o correto dimensionamento dos equipamentos tornam-se decisivos para assegurar eficiência operacional e econômica.

Para estimar o consumo energético das alternativas convencionais, adotou-se a metodologia de Bond (1961). A principal métrica desta abordagem é o Work Index (WI), que quantifica a energia necessária para a cominuição do minério. Uma vez que as equações de Bond foram desenvolvidas para condições operacionais padronizadas, foi necessária a aplicação de fatores de correção para ajustar os cálculos às especificidades do nosso estudo de caso, como o diâmetro do moinho proposto e as características do circuito.

Na maioria das plantas, a etapa de moagem concentra a porção predominante do consumo elétrico, por isso a escolha do tipo de moinho e o seu dimensionamento afetam diretamente desempenho técnico e custos da produção. Em muitas operações industriais, especialmente naquelas de grande porte, como no setor de minério de ferro, fosfato e nióbio, localizadas em regiões como o estado de Minas Gerais, a necessidade energética da moagem pode ultrapassar, em alguns casos, 50% da energia elétrica total utilizada na planta, conforme indicam estudos da Coalition for Energy Efficient Comminution (CEEC, 2021) que destacam a cominuição como a principal consumidora de energia em diversas operações minerais.

Essa realidade exige atenção crescente de engenheiros, planejadores e gestores de ativos industriais na busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis. No Brasil, país com vocação mineral histórica e expressiva, a mineração corresponde a uma parcela significativa do PIB industrial e exerce influência direta sobre a economia de estados como Minas Gerais, onde a Engenharia Química está profundamente conectada com o setor extrativo mineral. Assim, o domínio técnico sobre equipamentos de moagem e a compreensão de seus impactos econômicos e energéticos são competências essenciais na formação do engenheiro químico local.

Benefícios técnicos ganham ainda mais relevância no atual cenário global, onde a descarbonização da economia é um dos pilares centrais das políticas públicas e das estratégias empresariais. A Agenda 2030 da ONU, o Acordo de Paris, os compromissos ESG (Environmental, Social and Governance) das empresas e as metas de neutralidade de carbono estabelecidas por grandes players do setor mineral impõem um novo paradigma ao design de processos industriais.

Reduzir o consumo energético da moagem, portanto, vai além de uma decisão econômica, trata-se de um compromisso ambiental, que pode viabilizar inclusive o acesso a créditos de carbono e financiamento internacional com taxas diferenciadas.

Nesse cenário, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar uma análise comparativa técnico-econômica entre moinhos autógenos (AG) e moinhos convencionais (SAG, bolas e barras), com foco na realidade industrial brasileira. A proposta inclui uma avaliação de indicadores como consumo específico de energia (kWh/t), custo de implantação (CAPEX), custo operacional por hora (OPEX), e valor presente líquido dos custos. A comparação será sustentada por dados

da literatura internacional e nacional, com ênfase em estudos de viabilidade na indústria de mineração no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A moagem é uma das etapas mais críticas no beneficiamento mineral, pois é responsável pela liberação da fração de interesse para as fases subsequentes de concentração e refino. Sua relevância se acentua não apenas pela contribuição técnica ao processo, mas pelo elevado consumo energético que representa frequentemente acima de 50% do total da planta (CEEC, 2021). Em especial no Brasil, onde a mineração de ferro desempenha papel estratégico, o dimensionamento e a escolha adequada de moinhos se tornam fundamentais para garantir eficiência técnica, econômica e ambiental.

Neste contexto, ganha destaque a análise comparativa entre diferentes tecnologias de moagem, com ênfase na substituição de moinhos autógenos (AG) por moinhos convencionais, como os de bolas e de barras. A hipótese de tal troca se torna ainda mais relevante diante dos desafios impostos pela descarbonização e pela busca por operações mais sustentáveis. Além disso, a aplicação da abordagem de Bond (1961) permite estimar a energia consumida na moagem, sendo essencial para a tomada de decisão baseada em dados técnico-econômicos.

2.2 Fundamentos técnicos dos moinhos utilizados

2.2.1 Moinhos autógenos

Nos autógenos, o minério atua como meio moedor, dispensando corpos metálicos. Isso tende a reduzir consumíveis e simplificar o circuito, quando a distribuição granulométrica e a competência da rocha são adequadas (METSO, 2005).

Contudo, sua alta sensibilidade às características do minério e a necessidade

de controle fino do processo limitam sua aplicação. Em plantas industriais com variação na alimentação ou alto volume de produção, sua eficiência pode ser comprometida.

2.2.2 Moinhos de bolas

Como etapa secundária/remolienda, os moinhos de bolas, operando usualmente em circuito fechado, são robustos e versáteis para afinar o produto. Utiliza-se bolas metálicas como meio moedor, e opera em regime de recirculação com classificadores. Sua robustez, adaptabilidade a diferentes materiais e capacidade de produzir partículas finas tornam-no uma alternativa segura ao moinho autógeno (GUPTA; YAN, 2016; METSO, 2005).

Entretanto, apresenta maiores custos com reposição de bolas e maior desgaste interno, o que impacta no OPEX.

2.2.3 Moinhos de barras

Utilizam barras de aço como meio moedor e são mais indicados para moagem grossa. Têm menor razão de redução, mas produzem menos ultrafinos e permitem um fluxo de entrada mais grosseiro que os moinhos de bolas. Seu uso tem diminuído devido à menor eficiência energética, mas ainda é viável em alguns cenários específicos (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

2.3 Comparativo técnico-econômico

A análise técnico-econômica é essencial para justificar a troca de um moinho autógeno por moinhos convencionais. Nesse sentido, dois aspectos centrais devem

ser considerados: a necessidade energética (eficiência) e os custos de implantação e operação (CAPEX e OPEX).

2.3.1 Consumo energético

Estudos como o de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) demonstram que a otimização da alimentação dos moinhos AG pode reduzir a carga energética em até 40%. No entanto, esse desempenho está condicionado à granulometria adequada e à homogeneidade do minério.

As tecnologias convencionais, por outro lado, apresentam necessidade energética previsível e passível de estimativa via abordagem de Bond (1961), especialmente útil em projetos de substituição. A energia estimada (kWh/t) pode ser comparada diretamente com dados experimentais do moinho autógeno, permitindo avaliar qual solução é mais eficiente energeticamente para o mesmo grau de cominuição.

2.3.2 CAPEX e OPEX

Moinhos autógenos, apesar de requererem CAPEX elevado devido ao seu porte e necessidade de sistemas de controle avançados, podem reduzir o número de equipamentos e a necessidade de britagem. Já os convencionais possuem CAPEX relativamente menor, mas tendem a apresentar OPEX mais alto por conta do consumo de corpos moedores (CETEM, 2010; METSO, 2005).

A decisão pela troca depende, portanto, de um balanço entre o investimento inicial, os custos ao longo da vida útil do equipamento e a eficiência energética, além da robustez e da previsibilidade da operação.

2.4 Metodologia de Estimativa de Energia

Para a análise comparativa entre o moinho autógeno em operação e os moinhos convencionais propostos, utiliza-se o Método de Bond (1961), uma das técnicas mais consagradas na indústria mineral para estimar a energia específica necessária para a redução de tamanho do minério.

Estima-se a energia específica por Bond a partir do WI da mistura de minério. Como as equações foram derivadas para condições-padrão, é necessária a introdução de fatores de correções adimensionais que ajustam rota, circuito, dimensões e razões de redução, aplicando apenas os termos pertinentes ao arranjo simulado. Os dados de WI são extraídos da literatura técnica (METSO, 2005) conforme a composição do minério de ferro tratado.

Os cálculos incluem fatores de correção associados às condições operacionais (via seca/úmida, circuito aberto/fechado, diâmetro do moinho, etc.), conforme descrito por Gupta e Yan (2016). Também são utilizadas as equações para estimativa de F_{80} para as simulações nos 21 pontos experimentais reportados Behnamfard, Roudi e Veglio (2020).

2.5 Análise de Sustentabilidade e Eficiência Energética

A mudança de moinhos AG por moinhos convencionais não deve considerar apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também os impactos ambientais e a aderência às metas de sustentabilidade.

Reduzir a necessidade energética da moagem impacta diretamente na pegada de carbono da planta, especialmente em regiões onde a matriz energética inclui fontes não-renováveis. A adoção de tecnologias otimizadas pode contribuir com as metas ESG, como a neutralidade de carbono até 2050, conforme relatado por empresas como a Vale (VALE, 2022).

Neste sentido, mesmo que os moinhos de bolas e barras apresentem consumo

energético levemente superior em algumas condições, a alternativa de operação estável, previsível e a modelagem precisa por Bond podem favorecer sua adoção.

2.6 Considerações Finais da Revisão Bibliográfica

A escolha do moinho adequado para uma planta de beneficiamento mineral é uma decisão complexa que envolve múltiplas variáveis técnicas, econômicas e ambientais. Moinhos autógenos apresentam vantagens operacionais relevantes, mas sua alta sensibilidade às variações do minério e seu CAPEX elevado podem limitar sua aplicação.

A troca por moinhos convencionais, quando bem fundamentada por simulações de energia, pode se mostrar vantajosa, especialmente em cenários industriais brasileiros. Além disso, a maior previsibilidade operacional, a familiaridade dos operadores com os equipamentos e a facilidade de manutenção são parâmetros que favorecem os moinhos de bolas e barras.

A revisão apresentada fornece a base teórica para a comparação proposta neste estudo, alinhando aspectos técnicos, energéticos e econômicos ao contexto da mineração nacional e às exigências contemporâneas de sustentabilidade.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é realizar uma análise técnico-econômica comparativa entre diferentes tipos de moinhos utilizados na etapa de moagem de minérios, com ênfase nos moinhos autógenos (AG) acerca dos moinhos semiautógenos (SAG), de bolas e de barras. A análise será contextualizada à realidade da indústria mineral brasileira, com foco na eficiência energética, custos operacionais e impactos econômicos de médio prazo.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a aplicação dos fatores de correção para as estimativas realizadas através do método de Bond (1961), apresentada em Gupta e Yan (2016);
- Apresentar os fundamentos técnicos dos principais tipos de moinhos utilizados na indústria de processamento mineral;
- Levantar dados técnicos e econômicos (CAPEX e OPEX) relacionados à operação dos moinhos AG, SAG, de bolas e de barras;
- Simular e comparar os custos de cada tecnologia ao longo de um horizonte de 10 anos;
- Avaliar o impacto da escolha do tipo de moinho na redução de custos operacionais e no consumo energético.

Esses objetivos visam garantir uma maior eficiência do processo, para verificar a viabilidade da transição do moinho autógeno por um tradicional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Tomou-se como caso de referência o conjunto de 21 condições operacionais reportado por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) para um circuito com moinho autógeno. Com esse conjunto como base, compararam-se alternativas convencionais (barras, bolas e SAG) para a mesma faixa de operação. As estimativas de potência seguem Bond (1961) e os custos (CAPEX/OPEX) são trazidos ao contexto brasileiro, avaliando-se as opções por valor presente líquido (VPL) em um horizonte de 10 anos.

4.1 Metodologia

Esta pesquisa baseia-se no desenvolvimento de estimativas de potência e energia e de CAPEX, OPEX e VPL para moinhos convencionais (bolas, barras e SAG), tomando como referência o caso do moinho autógeno analisado por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) e com base nos conceitos das disciplinas de Operações Unitárias e Avaliação Técnico-Econômica de Processos Industriais.

Para estimar a carga energética, adotou-se a abordagem de Bond. Essa abordagem foi deduzida para um cenário de referência: barras operando em circuito aberto úmido e bolas em regime com recirculação úmido, tomando 2,44 m como diâmetro referencial do moinho. Como o arranjo estudado não coincide integralmente com essas condições, a estimativa é corrigida por um fator total que agrega oito ajustes clássicos da literatura.

A abordagem proposta por Bond permite quantificar, para cada ensaio realizado, o valor do Work Index (WI) característico do material. Para atribuir valores a cada composição identificada nos experimentos, recorre-se à literatura, em particular ao manual de britagem publicado pela Metso (2005), que fornece dados típicos de WI algumas distribuições de minério rico em ferro. Adicionalmente, será realizada a discussão sobre os resultados obtidos com seu uso e a elaboração das conclusões, abordando as possíveis contribuições que este trabalho poderá trazer ao processo estudado. Os dados de Work Index (WI) podem ser visualizados na Tabela

1.

Tabela 1 - WI por composição.

Material	Wi
Minério de Fe	15,44
Hematita	12,68
Minério de pirita	8,9
Hematita - especular	15,4
Hem, Oolitica	11,33
Hem Magnesita	10,21
Hem taconita	14,87

Fonte: METSO (2005).

Empregaram-se os 21 ensaios publicados por Behnamfard, Roudi e Veglio (2020), no qual se estimam a potência e energia específica condicionada pela alimentação fresca. Esses valores foram utilizados como base nas estimativas apresentadas neste trabalho.

Para fins de simulação e por falta de dados granulométricos específicos da carga de entrada em cada ensaio, assumiu-se que o moinho seria alimentado com a granulometria ótima de projeto, em que para alimentação (F_{80}) nos 21 ensaios, estima-se F_{80} através das relações de F_0 (tamanho ótimo alimentado) que são apresentadas para o projeto dos moinhos de barras e bolas nas Equações 1 e 2, em sequência.

$$F_0 = 16000 \sqrt{\frac{14,3}{Wi}} \quad (1)$$

$$F_0 = 4000 \sqrt{\frac{14,3}{Wi}} \quad (2)$$

A partir dos dados de P_{80} descritos nos pontos experimentais e o F_0 calculado, é possível obter os parâmetros de energia e potência através das Equações 3 e 4.

$$E = Wi \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_0}} \right] \quad (3)$$

$$P = Q.E \quad (4)$$

Como as equações de Bond foram derivadas para condições-padrão, aplicam-se 8 fatores adimensionais de correção que ajustam efeitos de rota (seca/úmida), configuração de circuito, dimensões do moinho e razões de redução. Neste estudo, apenas os termos pertinentes ao arranjo simulado foram utilizados.

Para compatibilizar as condições do caso com o padrão de Bond, adotou-se um fator total de correção que agrega todos os 8 parâmetros de correção, a partir de efeitos de rota, circuito, dimensões, adequação granulométrica e eficiência do estágio de barras. Esse fator multiplica a potência calculada, preservando a estrutura da aplicação. As regras seguem a literatura técnica (Bond, 1961; Gupta; Yan, 2016).

Por meio dos parâmetros de correção é possível determinar os dados atualizados de potência para cada uma das estimativas. Porém, como cada fator está associado a uma determinada condição, nem todos eles serão aplicados em conjunto para os cálculos dos valores de potência.

Fazem-se, então, as hipóteses de cada uma das condições, com o objetivo de se levar em conta diferentes parâmetros de correção e o que melhor se adequa. Realizam-se cálculos para obter esses dados, considerando as necessidades específicas de cada condição. Por fim, realizam-se as comparações de cada cenário estudado, a fim de se verificar o que apresentou melhor eficiência energética.

Do ponto de vista econômico, serão levantados os valores de CAPEX (custo de implantação) e OPEX (custo operacional por tonelada processada) de cada tipo de moinho. Esses dados serão obtidos de fontes da literatura técnica, fabricantes e estudos de caso nacionais. Com base nessas informações, será realizada uma simulação de fluxo de caixa acumulado ao longo de um horizonte de 10 anos, considerando indicadores como:

- Energia consumida (kWh/t);
- Custo operacional total (OPEX);
- Produtividade (t/h);
- Valor presente líquido (VPL).

Ao final, os resultados serão comparados com base em critérios de eficiência energética e viabilidade econômica, visando identificar a melhor solução para troca do moinho autógeno, dentro do contexto da mineração brasileira.

Para a estimativa de custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) dos moinhos de bolas, de barras e SAG, utilizou-se o modelo paramétrico de custo de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014). Este modelo correlaciona os custos diretamente com a potência do equipamento através de uma função de regressão univariada, sendo uma metodologia de estimativa de custos padrão da indústria.

Para a estimativa de custos do moinho autógeno (AG), que não possui um modelo de custo específico na pesquisa de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014), adotou-se uma regra heurística. Segundo Napier-Munn (1996) e Morrell (2004), a ausência de corpos moedores no AG reduz o OPEX não-energético quanto ao SAG. Para os cálculos, assumiu-se um valor intermediário de 65% do custo operacional do moinho SAG.

Realizou-se a análise de viabilidade econômica através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) dos custos, considerando um horizonte de 10 anos. A taxa de desconto utilizada foi de 15% ao ano, em linha com a meta Selic definida pelo Copom em 18/06/2025 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2025b). O cálculo do OPEX anual considerou a premissa de 8760 horas de operação por ano, valor padrão para uma operação contínua. O OPEX Total foi composto pela soma dos custos não-energéticos, calculados pelo modelo de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014), e dos custos com energia elétrica.

Para a análise de custos, adotou-se R\$ 0,65/kWh como valor conservador, levemente superior à tarifa média faturada da classe industrial em dez/2023 (R\$ 0,638/kWh), reportada pelo Informativo Tarifário do Setor Elétrico (BRASIL, 2024). O objetivo é dispor de um referencial unificado para comparar as tecnologias, desconsiderando bandeiras tarifárias e reajustes posteriores.

A metodologia integra a estimativa de potência pelo método de Bond, a modelagem paramétrica de CAPEX/OPEX de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014) e heurísticas para o moinho AG, compondo a base da comparação entre as tecnologias.

5 RESULTADOS

No estudo de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) foram coletados 21 pontos experimentais, os quais serão utilizados como critério de comparação para o projeto dos moinhos tradicionais através da potência estimada através do modelo Minnovex adaptado. Essa potência é calculada pela Equação 4. Os dados estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de Potência estimados pelo modelo Minnovex adaptado.

Ensaio Nº	SPI (min)	Q (t/h)	E _{real} (kWh/t)	P modelo (kW)	P (kW)
1	94,00	370,31	8,67	8,50	3147,64
2	112,00	375,49	9,49	9,53	3578,42
3	92,00	637,29	8,48	8,35	5321,37
4	94,00	601,24	8,2	8,51	5116,55
5	74,00	400,31	7,13	7,34	2938,28
6	76,00	439,62	7,41	7,45	3275,17
7	102,00	459,62	9,28	9,01	4141,18
8	98,00	421,19	8,75	8,76	3689,62
9	84,00	495,07	8,1	7,90	3911,05
10	94,00	524,44	8,91	8,45	4431,52
11	84,00	561,08	7,65	7,91	4438,14
12	76,00	486,06	7,32	7,42	3606,57
13	70,00	415,19	7,1	7,10	2947,85
14	78,00	472,56	7,27	7,57	3577,28
15	82,00	492,96	7,23	7,75	3820,44
16	78,00	534,74	7,5	7,53	4026,59
17	92,00	683,18	8,76	8,37	5718,22
18	58,00	521,47	6,63	6,38	3326,98
19	60,00	565,35	6,88	6,53	3691,74
20	65,00	553,7	7,05	6,77	3748,55
21	108,00	511,39	9,42	9,30	4755,93

Fonte: Adaptado de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020).

A partir dos resultados obtidos com o modelo Minnovex adaptado, estimou-se uma potência média de 3962,34 kW, o que representa um consumo médio de energia de 7,91 kWh/t. Esse valor representa a demanda energética prevista para o moinho AG no cenário estudado, considerando as condições específicas do minério de ferro analisado.

5.1 Sem aplicação de fatores de correção

Com o intuito de estimar a potência para os moinhos tradicionais através da abordagem de Bond, é necessário obter os parâmetros de Work Index equivalentes aos dados de SPI (SAG Power Index) utilizados na pesquisa de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020) e os valores de F_0 e P_{80} do processo, com o intuito de se calcular os parâmetros de Energia em cada um dos 21 ensaios.

Para atribuir WI às distribuições observadas nos ensaios, tomaram-se como referência faixas típicas reportadas na literatura, em especial no manual de britagem da Metso (2005). A Tabela 1 sintetiza os valores adotados.

Não existe uma relação direta entre SPI e WI. Entretanto, é possível estabelecer uma correspondência empírica, considerando que ambos os índices medem a resistência do minério à cominuição. Neste trabalho, adotaram-se os dados máximos e mínimos obtidos de SPI e WI, e, por meio de interpolação linear, obteve-se a relação apresentada na Equação 5. Essa abordagem permitiu construir uma faixa de equivalência ajustada ao componente investigado, possibilitando a comparação entre alternativas de moagem autógena/semi-autógena e moagem convencional com base em parâmetros consistentes e representativos da realidade do minério de ferro considerado.

$$WI = \frac{(6,5 * SPI) + 103,6}{54} \quad (5)$$

Com o WI definido em cada ponto, determina-se F_{80} , Conforme Gupta e Yan (2016). Neste estudo, estima-se a F_{80} pelas equações do F_0 , conforme é mostrado nas Equações 1 e 2, em sequência. Em seguida, calcula-se a energia através da Equação 3.

Para obter uma representação mais precisa do desempenho energético de cada circuito de moagem, foram calculadas as médias ponderadas pela vazão do fluxo alimentado. A média ponderada leva em conta a contribuição relativa de cada ponto em razão da vazão processada. Esta abordagem é particularmente relevante quando há variações significativas na vazão entre os ensaios, pois evita que pontos com baixa

produção influenciem de forma desproporcional o valor médio. Os cálculos foram realizados conforme a Equação 6.

$$Energia_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (6)$$

Aplicando o procedimento às variáveis Q, SPI e P₈₀, obtêm-se as potências para barras e bolas (Tabelas 3 e 4). As diferenças nas relações de F₀ entre os moinhos explicam a variação observada nos valores de potência.

Tabela 3 - Potência estimada por Bond para o moinho de barras.

Ensaio N°	SPI (min)	Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₀ (µm)	E (kWh/t)	P (kW)
1	94,00	370,31	432,00	13,23	16632,34	5,34	1977,75
2	112,00	375,49	611,00	15,40	15417,99	4,99	1873,67
3	92,00	637,29	619,00	12,99	16785,72	4,22	2688,94
4	94,00	601,24	374,00	13,23	16632,34	5,82	3497,22
5	74,00	400,31	317,00	10,83	18388,89	5,28	2114,48
6	76,00	439,62	335,00	11,07	18187,78	5,23	2297,35
7	102,00	459,62	322,00	14,20	16058,33	6,79	3121,28
8	98,00	421,19	365,00	13,71	16337,78	6,11	2571,65
9	84,00	495,07	485,00	12,03	17444,63	4,55	2253,35
10	94,00	524,44	736,00	13,23	16632,34	3,85	2020,02
11	84,00	561,08	396,00	12,03	17444,63	5,13	2880,76
12	76,00	486,06	494,00	11,07	18187,78	4,16	2021,30
13	70,00	415,19	324,00	10,34	18811,98	4,99	2072,92
14	78,00	472,56	327,00	11,31	17993,12	5,41	2556,57
15	82,00	492,96	698,00	11,79	17621,85	3,57	1761,88
16	78,00	534,74	527,00	11,31	17993,12	4,08	2183,14
17	92,00	683,18	498,00	12,99	16785,72	4,82	3292,44
18	58,00	521,47	335,00	8,90	20281,17	4,24	2209,80
19	60,00	565,35	229,00	9,14	20012,31	5,39	3049,62
20	65,00	553,7	475,00	9,74	19384,33	3,77	2087,70
21	108,00	511,39	588,00	14,92	15664,81	4,96	2536,66

Fonte: Autor.

Considerando os parâmetros estimados para o moinho de barras, aos quais ainda não foram aplicados fatores de correção, obteve-se uma potência média de aproximadamente 2431,83 kW. Esse resultado representa uma estimativa preliminar

da demanda energética para este tipo de equipamento, considerando as condições padrão da abordagem de Bond. Apesar de fornecer uma boa referência inicial, essa estimativa ainda não leva em conta as particularidades do sistema real, como o diâmetro ampliado do moinho ou a eficiência energética em condições específicas de operação.

Tabela 4 - Potência estimada por Bond para o moinho de bolas.

Ensaio Nº	SPI (min)	Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	WI	F ₀ (µm)	E (kWh/t)	P (kW)
1	94,00	370,31	432,00	13,23	4158,09	4,31	1597,77
2	112,00	375,49	611,00	15,40	3854,50	3,75	1407,97
3	92,00	637,29	619,00	12,99	4196,43	3,22	2049,85
4	94,00	601,24	374,00	13,23	4158,09	4,79	2880,29
5	74,00	400,31	317,00	10,83	4597,22	4,48	1794,90
6	76,00	439,62	335,00	11,07	4546,94	4,41	1936,61
7	102,00	459,62	322,00	14,20	4014,58	5,67	2606,38
8	98,00	421,19	365,00	13,71	4084,44	5,03	2119,72
9	84,00	495,07	485,00	12,03	4361,16	3,64	1802,44
10	94,00	524,44	736,00	13,23	4158,09	2,83	1481,89
11	84,00	561,08	396,00	12,03	4361,16	4,22	2369,73
12	76,00	486,06	494,00	11,07	4546,94	3,34	1622,44
13	70,00	415,19	324,00	10,34	4702,99	4,24	1759,78
14	78,00	472,56	327,00	11,31	4498,28	4,57	2158,22
15	82,00	492,96	698,00	11,79	4405,46	2,69	1324,10
16	78,00	534,74	527,00	11,31	4498,28	3,24	1732,37
17	92,00	683,18	498,00	12,99	4196,43	3,82	2607,33
18	58,00	521,47	335,00	8,90	5070,29	3,61	1883,91
19	60,00	565,35	229,00	9,14	5003,08	4,75	2684,32
20	65,00	553,7	475,00	9,74	4846,08	3,07	1700,24
21	108,00	511,39	588,00	14,92	3916,20	3,77	1927,10

Fonte: Autor.

No caso do moinho de bolas, os parâmetros estimados sem correções indicaram uma potência média de aproximadamente 1973,68 kW. Assim como no caso do moinho de barras, trata-se de uma estimativa baseada nas condições ideais assumidas pela abordagem de Bond. Esses valores serão posteriormente ajustados por meio de parâmetros de correção apropriados, permitindo uma avaliação mais realista do desempenho esperado dos moinhos em condições operacionais

semelhantes àquelas do estudo de caso.

5.2 Aplicação dos fatores de correção

Como as equações de Bond foram propostas para condições-padrão, a aplicação em cenários distintos requer fatores de correção que capturam rota, circuito, dimensões e razões de redução. O fator total resulta do produto dos termos aplicáveis (BOND, 1961; GUPTA; YAN, 2016)

Dentre os parâmetros de correção propostos na abordagem de Bond, apenas os fatores de correção 3, 7 e 8 serão relevantes para a estimativa em estudo.

O terceiro fator (F3) é aplicado, uma vez que será proposto um diâmetro interno diferente de 2,44 metros, com o objetivo de ter as mesmas dimensões do moinho autógeno do estudo de Behnamfard, Roudi e Veglio (2020). Assume-se maior eficiência energética em função do maior diâmetro do moinho. Esse fator somente pode ser calculado após a escolha prévia do moinho. Tal relação é descrita pela Equação 7.

$$F3 = \left(\frac{8}{D}\right)^{0,2} \quad (7)$$

O sétimo fator (F7) está relacionado com a razão de redução em um moinho de bolas, somente é utilizado quando a relação de redução (F_0/P_{80}) for menor do que 6. Calcula-se o F7 pela Equação 8:

$$F7 = \frac{R_R - 1,22}{R_R - 1,35} \quad (8)$$

Para moinho de barras operando de forma isolada em circuito fechado, adota-se F8 como sendo igual a 1,2, representando a eficiência típica desse arranjo reportada na literatura (GUPTA; YAN, 2016).

Com os fatores definidos, calcula-se o fator de correção total (FT) como o

produto de todos os fatores de correção, conforme a Equação 9.

$$FT = F1.F2.F3.F4.F5.F6.F7.F8 \quad (9)$$

A potência corrigida é obtida a partir da Equação 4, combinando vazão, energia específica e o fator total, resultando na Equação 10.

$$P = Q.E.FT \quad (10)$$

Com o fator de correção total aplicado, as Tabelas 5 e 6 apresentam a potência obtida para os moinhos de barras e de bolas.

Tabela 5 - Potência estimada e corrigida por Bond para o moinho de barras.

Ensaio Nº	SPI (min)	Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	F ₀ (µm)	E (kWh/t)	FT	P (kW)
1	94,00	370,31	432,00	16632,34	5,34	1,01	1993,57
2	112,00	375,49	611,00	15417,99	4,99	1,01	1888,66
3	92,00	637,29	619,00	16785,72	4,22	1,01	2710,45
4	94,00	601,24	374,00	16632,34	5,82	1,01	3525,20
5	74,00	400,31	317,00	18388,89	5,28	1,01	2131,40
6	76,00	439,62	335,00	18187,78	5,23	1,01	2315,73
7	102,00	459,62	322,00	16058,33	6,79	1,01	3146,25
8	98,00	421,19	365,00	16337,78	6,11	1,01	2592,22
9	84,00	495,07	485,00	17444,63	4,55	1,01	2271,38
10	94,00	524,44	736,00	16632,34	3,85	1,01	2036,18
11	84,00	561,08	396,00	17444,63	5,13	1,01	2903,81
12	76,00	486,06	494,00	18187,78	4,16	1,01	2037,47
13	70,00	415,19	324,00	18811,98	4,99	1,01	2089,51
14	78,00	472,56	327,00	17993,12	5,41	1,01	2577,02
15	82,00	492,96	698,00	17621,85	3,57	1,01	1775,98
16	78,00	534,74	527,00	17993,12	4,08	1,01	2200,60
17	92,00	683,18	498,00	16785,72	4,82	1,01	3318,78
18	58,00	521,47	335,00	20281,17	4,24	1,01	2227,48
19	60,00	565,35	229,00	20012,31	5,39	1,01	3074,02
20	65,00	553,7	475,00	19384,33	3,77	1,01	2104,40
21	108,00	511,39	588,00	15664,81	4,96	1,01	2556,96

Fonte: Autor.

Com a aplicação dos parâmetros de correção pertinentes, especialmente o

fator F8 (eficiência do moinho de barras), observou-se uma potência média corrigida de aproximadamente 2451,29 kW, o que representa um consumo médio de energia de 4,85 kWh/t. Esse valor é muito próximo da estimativa obtida sem correções, o que indica que, para este cenário específico, os ajustes considerados não provocaram uma variação significativa na potência final estimada. Ainda assim, a aplicação desses parâmetros é essencial para garantir maior aderência às condições reais de operação, reforçando a validade da abordagem de Bond quando corretamente ajustada.

Tabela 6 - Potência estimada e corrigida por Bond para o moinho de bolas.

Ensaio Nº	SPI (min)	Q (t/h)	P ₈₀ (µm)	F ₀ (µm)	E (kWh/t)	FT	P (kW)
1	94,00	370,31	432,00	4158,09	4,31	0,84	1342,13
2	112,00	375,49	611,00	3854,50	3,75	0,84	1182,69
3	92,00	637,29	619,00	4196,43	3,22	0,84	1721,87
4	94,00	601,24	374,00	4158,09	4,79	0,84	2419,44
5	74,00	400,31	317,00	4597,22	4,48	0,84	1507,71
6	76,00	439,62	335,00	4546,94	4,41	0,84	1626,75
7	102,00	459,62	322,00	4014,58	5,67	0,84	2189,36
8	98,00	421,19	365,00	4084,44	5,03	0,84	1780,56
9	84,00	495,07	485,00	4361,16	3,64	0,84	1514,05
10	94,00	524,44	736,00	4158,09	2,83	0,87	1282,42
11	84,00	561,08	396,00	4361,16	4,22	0,84	1990,58
12	76,00	486,06	494,00	4546,94	3,34	0,84	1362,85
13	70,00	415,19	324,00	4702,99	4,24	0,84	1478,22
14	78,00	472,56	327,00	4498,28	4,57	0,84	1812,90
15	82,00	492,96	698,00	4405,46	2,69	0,84	1112,24
16	78,00	534,74	527,00	4498,28	3,24	0,84	1455,19
17	92,00	683,18	498,00	4196,43	3,82	0,84	2190,16
18	58,00	521,47	335,00	5070,29	3,61	0,84	1582,49
19	60,00	565,35	229,00	5003,08	4,75	0,84	2254,83
20	65,00	553,7	475,00	4846,08	3,07	0,84	1428,20
21	108,00	511,39	588,00	3916,20	3,77	0,84	1618,77

Fonte: Autor.

Já para o moinho de bolas, a aplicação dos fatores F3 (diâmetro) e F7 (relação de redução) resultou em uma potência média corrigida de aproximadamente 1659,69 kW, o que representa um consumo médio de energia de 3,94 kWh/t. Em comparação com a estimativa sem correções (1973,68 kW), nota-se uma redução na potência final,

refletindo o ganho de eficiência esperado para moinhos com maiores dimensões e ajustes nas condições de operação. Essa diferença reforça a importância de aplicar os parâmetros de correção propostos por Bond.

Para estimar a potência de um moinho do tipo SAG, a equação clássica de Bond não é diretamente aplicável. Assim, adotou-se uma abordagem heurística, baseada na interpolação entre os consumos energéticos calculados para os moinhos autógeno e de bolas. Conforme discutido por Napier-Munn (1996) e Morrell (2004), o desempenho energético de um moinho SAG, que combina a moagem autógena com o uso de uma pequena carga de bolas, tende a se situar em um nível intermediário entre um moinho puramente autógeno (AG) e um moinho de bolas.

Neste trabalho, para quantificar essa relação, a potência do moinho SAG foi estimada por meio de uma interpolação ponderada, atribuindo-se 75% da potência calculada para o moinho de bolas e 25% da potência do moinho AG. Essa proporção reflete uma configuração onde a ação moedora das bolas tem uma contribuição predominante, mas ainda com uma parcela do trabalho sendo realizada pelo próprio minério, por refletir que o SAG, embora híbrido, se comporta mais próximo de bolas devido ao uso de carga de corpos moedores, preservando a coerência física. Tal abordagem permite obter uma estimativa de potência consistente para o moinho SAG, refletindo uma carga de bolas dominante com contribuição autógena residual e viabilizando sua comparação com as demais tecnologias.

$$P_{sag} = 0,75 \times P_{bolas} + 0,25 \times P_{AG} \quad (11)$$

A partir da interpolação ponderada entre a potência média do moinho de bolas corrigida (1659,69 kW) e do moinho autógeno (3962,34 kW), atribuindo 75% ao primeiro e 25% ao segundo, obteve-se uma estimativa de 2235,35 kW para o moinho SAG, o que representa um consumo médio de energia de 4,93 kWh/t, valor que representa uma estimativa realista da demanda energética desse tipo de equipamento para o minério e condições operacionais avaliadas, servindo como base comparativa frente às demais alternativas analisadas.

5.3 Análise de custos das alternativas de moagem

A partir dos dados de energia estimados, é possível encontrar os custos operacionais envolvidos no processo, considerando dados de custo de energia e manutenção dos equipamentos no Brasil. Para referências brasileiras, utilizando-se de uma tarifa industrial média de R\$ 0,65/kWh.

Para a análise econômica, os custos de implantação (CAPEX) dos moinhos de bolas, de barras e SAG serão estimados a partir de um modelo paramétrico de custo, que correlaciona o CAPEX diretamente com a potência do equipamento. A metodologia adotada é baseada no estudo "A parametric cost model for mineral grinding mills" de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014). O modelo de regressão univariada utilizado para estimativas preliminares tem a seguinte forma, onde o custo é uma função da potência (P) em kW, de acordo com a Equação 12.

$$Custo_{Capital} = a \times (Potência)^b \quad (12)$$

Nota metodológica: escopo do CAPEX. Neste estudo, o termo CAPEX refere-se exclusivamente ao custo de aquisição do equipamento principal (moinho), conforme o modelo paramétrico adotado. Não estão incluídos custos de engenharia e gerenciamento, detalhamento, obras civis e fundações, instalações e montagens eletromecânicas, utilidades, infraestrutura de apoio, frete/seguro, comissionamento, contingências e demais indiretos. Assim, os dados reportados não representam o custo total de implantação do projeto, mas sim o custo do equipamento para fins comparativos entre alternativas.

Para a análise econômica, a correção dos custos de implantação (CAPEX) para o ano e a moeda atuais é fundamental para refletir a realidade econômica nacional. Os valores de CAPEX, calculados com base no modelo paramétrico de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014), estão em Dólares Americanos (US\$) de 2010. Desta forma, foi necessário ajustá-los pela inflação e convertê-los para Reais (R\$).

Com o objetivo de atualizar os custos de implantação (CAPEX) do ano base do estudo (2010) para o ano de referência deste trabalho, adotou-se o Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), índice amplamente utilizado para

escalonamento de custos de capital em projetos de engenharia. O procedimento foi realizado em duas etapas: (i) escalonamento do CAPEX em US\$ pelo CEPCI, com $CEPCI(2025) = 802,2$ e $CEPCI(2010) = 532,22$ (CHEMICAL ENGINEERING, 2025); e (ii) conversão cambial do resultado para R\$, adotou-se a PTAX de venda diária do Banco Central em 07/08/2025: R\$ 5,4632 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2025c). A expressão geral empregada é apresentada na Equação 13.

$$Custo_{anoB} = Custo_{anoA} \times \left(\frac{Índice_{anoB}}{Índice_{anoA}} \right) \quad (13)$$

A estimativa do custo de capital (CAPEX) para o moinho autógeno (AG) foi estabelecida sobre o princípio de engenharia de custos de que o CAPEX para equipamentos de cominuição é diretamente correlacionado à sua potência de projeto, conforme formalizado no modelo paramétrico da Equação 12. Por consistência metodológica, a mesma relação ponderada utilizada para o dimensionamento energético do moinho SAG, que o modela como um híbrido entre um moinho AG e um de bolas, foi transposta para a sua estrutura de custos. Essa abordagem alinha o fenômeno operacional de moagem ao seu indicador de custo mais direto, a potência, que atua como o principal direcionador do custo de capital. Assim, o custo do moinho SAG é tratado como a soma ponderada de seus componentes funcionais, permitindo que a Equação 14 seja algebricamente rearranjada para se calcular o CAPEX do moinho AG a partir dos modelos de referência.

$$Custo_{AG} = 4 \times Custo_{SAG} - 3 \times Custo_{bolas} \quad (14)$$

A Tabela 7 apresenta os coeficientes para a estimativa de CAPEX, os resultados encontrados com seus parâmetros calculados e corrigidos pela inflação.

Tabela 7 - Valores de CAPEX corrigidos por moinho.

Tipo de moinho	Coeficiente a	Coeficiente b	CAPEX (US\$)	CAPEX ajustado (US\$)	CAPEX ajustado (R\$)
Moinho de Bolas	$1,695 \times 10^4$	0,622	1.706.185	2.571.684	14.049.621
Moinho de Barras	$2,956 \times 10^4$	0,580	2.732.457	4.118.554	22.500.484

Moinho SAG	$1,970 \times 10^4$	0,664	3.299.375	4.973.053	27.168.786
Moinho AG	-	-	5.000.129	7.536.552	41.173.690

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014).

A partir dos dados obtidos, plotou-se o gráfico representado na Figura 2, onde é possível observar a comparação entre os custos de capital (CAPEX).

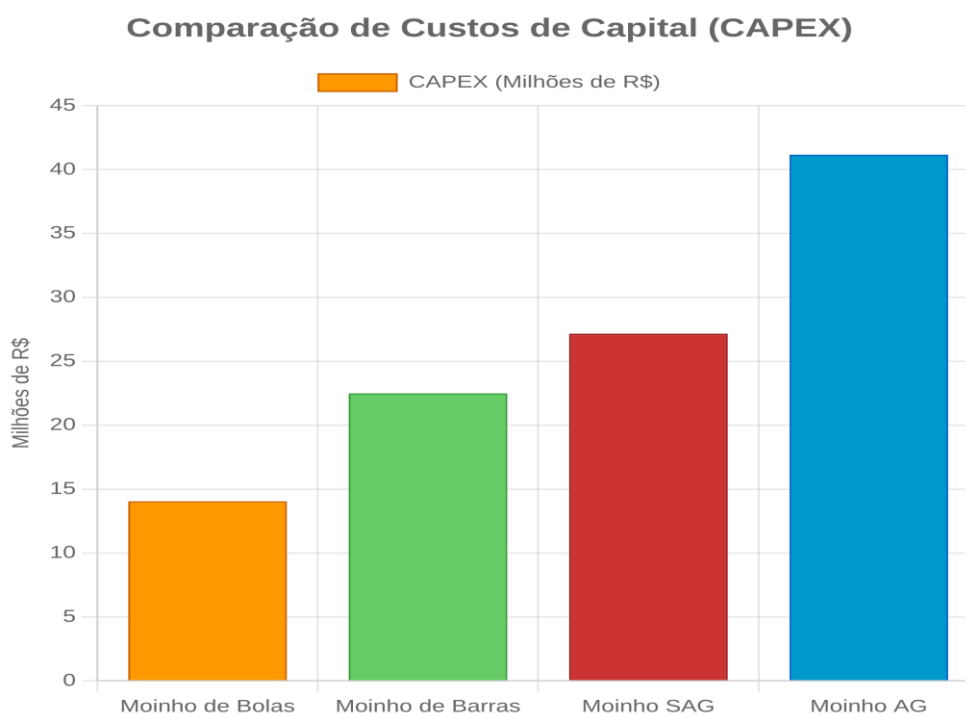


Figura 2 - Comparativo entre os CAPEX.

A Figura 2 evidencia que o moinho autógeno (AG) apresenta o maior custo de capital entre as alternativas, tornando-se a opção de maior investimento inicial. Em contrapartida, o moinho de bolas destaca-se pelo CAPEX mais competitivo, reforçando seu potencial como a alternativa economicamente mais acessível na fase de implantação.

Para a estimativa dos custos operacionais (OPEX), adota-se a mesma metodologia paramétrica de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014). O modelo de regressão univariada correlaciona o OPEX com a potência do equipamento em kW, sendo expresso pela Equação 15:

$$Custo_{operacional} = a \times (Potência)^b \quad (15)$$

Os coeficientes a e b para os moinhos de bolas, de barras e SAG foram extraídos da Tabela 2 do estudo de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014).

O ajuste inflacionário para o OPEX, foi realizado por meio da conversão dos valores em Dólar de 2010 para reais em 2010 e posteriormente calculou-se o IPCA acumulado pela Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil, módulo Correção de valores (IPCA – IBGE) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2025a). Para a conversão cambial, adotou-se a taxa PTAX comercial – venda, média anual de 2010, equivalente a US\$ 1 = R\$ 1,7603, apurada a partir das cotações diárias PTAX do Banco Central do Brasil (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2010).

Para a estimativa do custo operacional (OPEX) do moinho autógeno (AG), que não possui um modelo de custo específico no estudo de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014), adotou-se uma regra heurística fundamentada na principal diferença de funcionamento quanto ao moinho semiautógeno (SAG). O custo operacional de um moinho pode ser dividido em duas parcelas: carga energética (consumo de energia elétrica) e não energéticos. A parcela não energética é composta majoritariamente pelos custos com corpos moedores (bolas de aço, no caso do SAG) e revestimentos.

Conforme apontado por Napier-Munn (1996) e Morrell (2004), a ausência de bolas de aço como meio moedor no moinho AG resulta em uma redução significativa justamente nesta parcela de custo não energético, que se situa normalmente entre 20% e 40% em comparação com um moinho SAG de mesma capacidade. Considerando esta faixa, e buscando uma abordagem conservadora e representativa, adotou-se que o custo não energético do moinho AG seria 35% inferior ao do SAG, o que equivale a 65% do custo não energético deste último. Esta abordagem isola a principal fonte de economia e permite uma comparação mais consistente e transparente.

A Tabela 8 apresenta os coeficientes para a estimativa de OPEX e seus valores calculados e corrigidos pela inflação.

Tabela 8 - Valores de OPEX corrigidos por moinho.

Tipo de moinho	Coefficiente a	Coefficiente b	OPEX (US\$/h)	OPEX convertido (R\$/h)	OPEX ajustado (R\$/h)
Moinho de Bolas	0,565	0,830	265,87	468,01	1.103,10
Moinho de Barras	0,884	0,801	458,52	807,13	1.902,40
Moinho SAG	1,120	0,730	312,06	549,32	1.294,74
Moinho AG	-	-	202,84	357,06	841,59

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014).

A partir dos dados obtidos, plotou-se o gráfico representado na Figura 3, onde é possível observar a comparação entre os custos operacionais (OPEX).

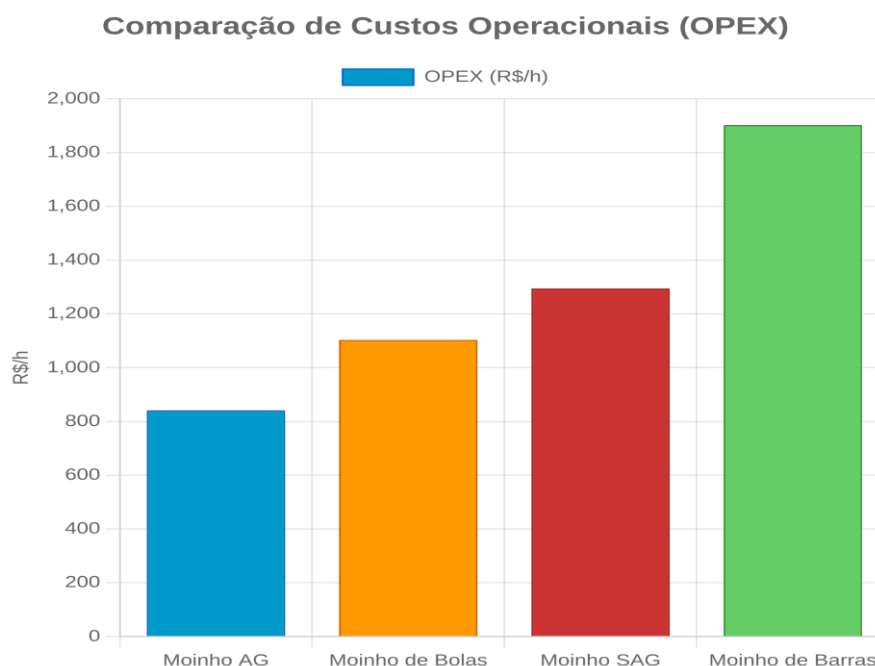


Figura 3 - Comparativo entre os OPEX.

A Figura 3 evidencia que o moinho autógeno (AG) apresenta o menor OPEX entre as tecnologias avaliadas, resultado diretamente associado à ausência de consumo de corpos moedores. Em contrapartida, os moinhos de barras, bolas e SAG apresentam custos não-energéticos superiores, refletindo a necessidade de reposição periódica de esferas ou barras de aço.

5.4 Análise de viabilidade econômica

Para a avaliação econômica das alternativas de moagem, realizou-se uma análise de Valor Presente Líquido (VPL) ao longo de um horizonte de 10 anos, em busca de alinhar a avaliação técnico-econômica à realidade de projetos de mineração no Brasil. O objetivo é comparar o custo total de cada alternativa, trazendo todos os fluxos de caixa de custos para o tempo presente. Utilizou-se uma taxa atualizada de desconto de 15% ao ano (i).

O VPL é calculado como a soma dos custos de CAPEX e dos custos de OPEX anuais, descontados ao valor presente. Neste caso, o VPL não representa a rentabilidade, mas sim o custo total do projeto ao longo do tempo. Assim, a alternativa com o menor VPL (o valor mais baixo) é a mais econômica.

O VPL é calculado com a fórmula de fluxo de caixa apenas com custos, onde o CAPEX é o fluxo de caixa do ano 0 e o OPEX anual é o fluxo de caixa dos anos 1 a 10, conforme a Equação 16.

$$VPL = CAPEX + \sum_{t=1}^{10} \frac{OPEX_{anual}}{(1+i)^t} \quad (16)$$

O OPEX anual total (em R\$) de cada moinho é a soma do OPEX anual não-energético, calculado pelo modelo de Sayadi, Khalesi e Khosfarman (2014), e do custo anual com energia elétrica, calculado separadamente, utilizando a energia calculada para os moinhos e a tarifa de R\$ 0,65/kWh. Para os cálculos, empregou-se 8760 horas de operação por ano, valor padrão para uma operação contínua.

A Tabela 9 apresenta os valores de CAPEX, OPEX anual e o VPL de cada moinho.

Tabela 9 - Análise Econômica Consolidada por moinho.

Tipo de moinho	CAPEX (R\$)	OPEX não energético anual (R\$)	Custo de energia anual (R\$)	OPEX anual total (R\$)	VPL dos custos
Moinho de Bolas	14.049.621	9.663.156	9.450.288	19.113.444	109.975.574

Moinho de Barras	22.500.484	16.665.024	13.956.234	30.621.258	176.181.493
Moinho SAG	27.168.786	11.341.922	12.729.480	24.071.402	147.977.583
Moinho AG	41.173.690	7.372.328	22.561.099	29.933.427	191.402.634

Fonte: Autor.

A partir dos dados obtidos para os parâmetros de OPEX anual total, plotou-se um gráfico comparativo entre as tecnologias representado pela Figura 4, com o objetivo de interpretar os valores e suas composições.

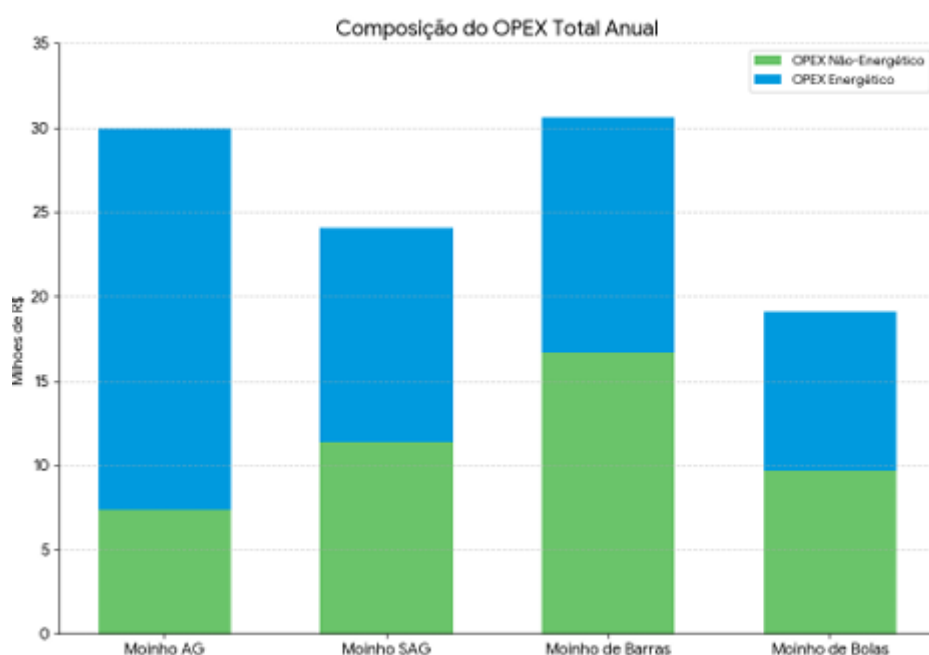


Figura 4: Composição do OPEX anual total.

A Figura 4 evidencia que, embora o moinho autógeno (AG) apresente o menor custo operacional não energético, o elevado gasto com energia elétrica anula essa vantagem, resultando em um OPEX anual total bastante elevado. Em contraste, o moinho de bolas demonstra maior equilíbrio entre custos energéticos e não energéticos, configurando-se como a alternativa mais competitiva dentro do cenário analisado.

A avaliação da viabilidade econômica, realizada através do Valor Presente Líquido (VPL) dos custos demonstra uma clara hierarquia entre as tecnologias. O moinho de bolas foi a solução mais econômica, apresentando o menor VPL (R\$ 109.975.574), beneficiado por um CAPEX competitivo e um OPEX total controlado. A

segunda opção mais viável é o moinho SAG (VPL de R\$ 147.977.583), seguido pelo moinho de barras (VPL de R\$ 176.181.493). Por fim, o moinho autógeno (AG), apesar de vantagens operacionais teóricas, resultou no maior VPL dos custos (R\$ 191.402.634), sendo penalizado por um investimento inicial superior que não foi compensado pela economia no OPEX não-energético. Essa ordenação, embora sensível às premissas de custos e à taxa de desconto, indica uma vantagem econômica para as tecnologias convencionais no cenário estudado.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou, de forma comparativa, quatro alternativas de moagem — moinho autógeno (AG), semiautógeno (SAG), de bolas e de barras — considerando aspectos técnicos, energéticos e econômicos. A determinação do consumo específico de energia foi realizada com base no método de Bond, adaptado conforme a aplicação, e complementada por heurísticas e interpolação no caso do SAG.

Os resultados obtidos indicaram que o moinho de bolas é a alternativa mais econômica, apresentando o menor custo total ao longo do horizonte de 10 anos. A análise de VPL a 15% a.a. demonstrou que essa tecnologia combina um CAPEX competitivo com um OPEX controlado, resultando no menor custo presente líquido (R\$ 109.975.574). O moinho SAG configurou-se como a segunda melhor opção (R\$ 147.977.583), seguido pelo moinho de barras (R\$ 176.181.493). Já o moinho autógeno, apesar de apresentar o menor OPEX não-energético entre todas as alternativas, conforme esperado teoricamente, foi a opção de maior custo total (R\$ 191.402.634), pois o elevado CAPEX inicial, aliado ao maior custo de energia, anulou a vantagem operacional e elevou o VPL final.

Ao avaliar a sustentabilidade das alternativas, é preciso reconhecer que cada tecnologia impõe um tipo distinto de impacto ambiental. O moinho autógeno (AG), embora dispense corpos moedores, apresenta elevada pegada de carbono devido ao seu expressivo consumo de energia elétrica. Já os moinhos de bolas e SAG, energeticamente mais econômicos, dependem de grandes volumes de esferas ou barras de aço, cuja fabricação e transporte estão associados a emissões relevantes do setor siderúrgico e da logística. Assim, a decisão entre as tecnologias envolve um balanço entre diferentes fontes de emissão, o que torna a análise de sustentabilidade mais complexa do que uma simples comparação de eficiência energética.

É fundamental destacar que os resultados da análise de Valor Presente Líquido (VPL) são fortemente influenciados pelo elevado custo da energia elétrica no Brasil. O moinho autógeno, por ser a tecnologia de maior necessidade energética entre as avaliadas, teve seu VPL significativamente penalizado, a ponto de o seu custo anual

com energia (R\$ 22,5 milhões) anular completamente a vantagem obtida com o menor OPEX não-energético. A tarifa industrial de R\$ 0,65/kWh, adotada como premissa conservadora neste estudo, reflete um cenário nacional adverso corroborado pela Confederação Nacional da Indústria, que posiciona o consumidor industrial brasileiro entre aqueles que pagam algumas das maiores tarifas entre os principais países exportadores (CNI, 2022). Dessa forma, o custo energético não é apenas uma variável no cálculo do OPEX, mas um fator estratégico decisivo que amplifica as diferenças de eficiência entre as tecnologias.

Assim, a análise econômico-financeira evidencia a maior viabilidade das tecnologias convencionais (bolas, SAG e barras) no tocante ao AG para o cenário estudado. Por fim, ressalta-se que a escolha do tipo de moinho deve considerar não apenas indicadores econômicos, mas também parâmetros operacionais, de disponibilidade de peças e a variabilidade do minério alimentado. Como limitações deste estudo, destacam-se o uso de dados heurísticos para estimativas de SAG e AG e a não consideração de receitas ou de cenários de preço do produto final. Trabalhos futuros podem incluir modelagem mais detalhada para SAG/AG, simulação de diferentes taxas de desconto e horizontes de análise, além da avaliação de impactos ambientais e de manutenção preventiva no custo total do ciclo de vida.

7 REFERÊNCIAS

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão: correção de valores por índices de preços (IPCA)**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2025a. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Copom eleva a taxa Selic para 15,00% a.a.** Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2025b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/detalhenoticia/20733/nota>. Acesso em: 27 ago. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações de câmbio – PTAX (histórico e boletins diários)**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2010. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estatisticas/historicocotacoes>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações e boletins**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2025c. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>. Acesso em: 07 ago. 2025.

BEHNAMFARD, A.; ROUDI, D. N.; VEGLIO, F. The performance improvement of a full-scale autogenous mill by setting the feed ore properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122554, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122554>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BOND, F. C. Crushing and grinding calculations, Part II. **British Chemical Engineering**, v. 6, p. 543-548, 1961.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Nacional de Energia Elétrica. Departamento de Políticas Setoriais. **Informativo tarifário do setor elétrico: ano 2023**. Brasília: MME, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/informativo-setor-eletrico/informativo-tarifario-do-setor-eletrico-ano-2023.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

CEEC. **Relatório Anual sobre Eficiência Energética na Cominuição**. Brisbane: Coalition for Energy Efficient Comminution, 2021.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). **Estudo comparativo de custos e eficiência em equipamentos de cominuição**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

CHEMICAL ENGINEERING. **Plant Cost Index Archives**. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Consumidor industrial do Brasil paga a segunda energia mais cara entre principais países exportadores**. Brasília: CNI, 27 jun. 2022. Disponível em: <https://jornalismo.portaldaindustria.com.br/cni/desafio-brasil/07%2006%20-%20INFRA%20Energia.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

GUPTA, A.; YAN, D. S. **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier, 2016.

LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S.C. A. **Tratamento de minérios**. 5ª edição. CETEM, 2010. 963p.

METSO. **Manual de britagem**. 6ª edição. Metso Minerals, 2005. 512p.

MORRELL, S. A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilization efficiency. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 11-12, p. 1255-1267, 2004.

MULAR, A. L.; JERGENSEN, G. V. **Design and Installation of Comminution Circuits**. New York: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1982.

NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral Comminution Circuits: their operation and optimisation**. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

SAYADI, Ahmad Reza; KHALES, Mohammad Reza; KHOSFARMAN, Mahsa. A parametric cost model for mineral grinding mills. **Minerals Engineering**, v. 55, p. 96-102, 2014.

VALE. **Relatório de Sustentabilidade 2022**. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2022.

VIEIRA, Wilson Luiz. **Minério de Ferro: Geologia e Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. Mineral Processing Technology: **An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Burlington: Elsevier, 2006.