

Geovan Olavo Damásio de Oliveira

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE
PESO DE MATERIAL EM MOINHO SAG**

**Canaã dos Carajás, PA
2020**

Geovan Olavo Damásio de Oliveira

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE
PESO DE MATERIAL EM MOINHO SAG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em Beneficiamento Mineral.

Orientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio

Canaã dos Carajás, PA
2020

Título: ANÁLISE DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE PESO DE MATERIAL EM MOINHO SAG

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (X) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48a

Oliveira, Geovan Olavo Damásio de
Análise dos efeitos da aplicação de controle automático de peso de material em moinho SAG/ Geovan Olavo Damásio de Oliveira - Ouro Preto, 2020.

50 f.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2020.
Orientador (a): Thiago Antonio Melo Euzébio

1. SAG. 2. Sossego. 3. Cobre. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Título.

CDD. 23. ed. 629.8

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 - 525

Geovan Olavo Damásio de Oliveira

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO
DE PESO DE MATERIAL EM MOINHO SAG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Beneficiamento Mineral].

Orientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 04 de setembro de 2020 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Thiago Antonio Melo Euzébio
Orientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

Moisés Tavares da Silva
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

Marlon Gonçalves Souza
Membro interno – VALE

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/1B4D-D257-B77C-4C2F> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/1B4D-D257-B77C-4C2F> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 1B4D-D257-B77C-4C2F



Hash do Documento

A1D671ED4211335614D470D0FD073B538FF83D44F1E62693CE407E11A6B4F7EC

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 30/09/2020 é(são) :

- Thiago Antonio Melo Euzébio (Signatário) - 017.511.735-77 em 30/09/2020 10:27 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica
Identificação: Por email: thiago.euzebio@itv.org

Evidências

Client Timestamp Wed Sep 30 2020 10:27:35 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -20.398134900000002 Longitude: -43.502596 Accuracy: 36

IP 191.5.83.143

Hash Evidências:

20677CB1B7798C5E6201113620261D3055A6883EB37B1FBE82CA658D189D70F5

- Moisés Tavares da Silva (Signatário) - em 25/09/2020 11:31 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica
Identificação: Por email: moises.silva@pq.itv.org

Evidências

Client Timestamp Fri Sep 25 2020 11:31:47 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -7.236069 Longitude: -35.890062 Accuracy: 389

IP 177.37.155.31

Hash Evidências:

9CC04D8D329F038CDF7060DB029AD4C4AAF6BC512A0EDDC7BA05395AB26BE241

- Marlon Gonçalves Souza (Signatário) - em 24/09/2020 08:49 UTC-03:00
Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: marlon.souza@vale.com

Evidências

Client Timestamp Thu Sep 24 2020 08:49:49 GMT-0300 (Hora oficial do Brasil)

Geolocation Latitude: -6.451499 Longitude: -50.077385 Accuracy: 216

Geolocation Latitude: -6.451499 Longitude: -50.077385 Accuracy: 216

IP 189.80.219.5

Hash Evidências:

F1528940C83EC458160542CCE9DEC52A27642167B39A5D57DEB9C4E83AD38C0C

Client Timestamp Thu Sep 24 2020 08:49:49 GMT-0300 (Hora oficial do Brasil)

Geolocation Latitude: -6.451499 Longitude: -50.077385 Accuracy: 216

Geolocation Latitude: -6.451499 Longitude: -50.077385 Accuracy: 216

IP 189.80.219.5

Hash Evidências:

F1528940C83EC458160542CCE9DEC52A27642167B39A5D57DEB9C4E83AD38C0C



À memória de meu irmão Ivan Olavo Damásio de Oliveira e de meu pai Ivan Olavo Brito de Oliveira. Infelizmente não podem presenciar, fisicamente, minhas conquistas, mas sei que estão sempre me dando forças, iluminando minhas decisões, sorrindo por cada vitória e me levantando a cada derrota.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao bom Deus que tem me guiado e me dado forças para superar os desafios de conciliar a vida acadêmica com a vida da indústria.

À minha querida mãe, Humberta Damásio, mulher guerreira e um exemplo de pessoa. Me criou de modo a ter empatia, a ser sempre educado e carinhoso com as pessoas, a ser honesto e principalmente a saber que viemos a este mundo para fazer o bem e deixar um legado por onde passarmos. Uma verdadeira líder, me inspira todos os dias.

Aos meus irmãos e irmãs que, mesmo longe, torcem por mim e vibram comigo.

À minha esposa, Suellen Santos, que me cobra e me apoia. Muito do foco para ter este trabalho concluído veio dos conselhos e cobranças dela. Me acompanha desde o meu início de carreira e todas as minhas conquistas profissionais foram ao lado dela e em função dos nossos objetivos de vida que traçamos juntos. Um exemplo de mãe, esposa, irmã, filha, tia e profissional.

Aos meus lindos filhos, Kayke e Ivan. Minha razão de viver.

A todos os meus companheiros e companheiras de trabalho. Passei mais de uma década em Sossego e criei muitos amigos com os quais aprendi muito e que me inspiraram a me desenvolver. Citar todos vai agregar mais umas 10 páginas neste TCC, mas vale citar 3 pessoas que são exemplos e que refletem todos os demais: Marlon Souza, Deivison Silva e George Aragão. Aos meus amigos de Serra Sul por segurarem à barra nos momentos de dedicação a este trabalho.

À equipe de automação Sossego, Ycele Casseb e Higor Barbosa.

À Diretoria de Metais Básicos do Atlântico Sul, pela indicação de meu nome para participação desta especialização.

Ao Instituto Tecnológico Vale – ITV, pela capacitação.

Ao meu orientador, Thiago Euzébio. Um professor de mãos cheias, nasceu para ensinar.

À Maria Lúcia, uma segunda mãe. Liderança inspiradora.

Ao Paulo Damasceno, grande mestre no trato com as pessoas. Liderança inspiradora.

Às amigas e amigos de turma da especialização. As aulas foram momentos de grande aprendizado e cada um torcendo pelo sucesso do outro. Uma verdadeira unidade.

Muito obrigado!!!

“As grandes conquistas da humanidade foram obtidas conversando, e as grandes falhas pela falta de diálogo.”.

Stephen Hawking

RESUMO

Este trabalho apresenta a motivação e os principais resultados da aplicação de um sistema de controle em um moinho SAG. O estudo é feito na mina de cobre do Sossego, em Canaã dos Carajás, no Pará. Uma análise da variabilidade de peso, consumo de energia e rendimento do produto é discutida. Os resultados destacam as vantagens da aplicação do sistema de controle proposto em comparação com a abordagem manual.

Palavras-Chave: SAG. Sossego. Cobre.

ABSTRACT

This work presents the motivation and main results of applying a control system to a SAG mill. The study is made on the Sossego copper mine in Canaã dos Carajás, Pará. An analysis of weight variability, energy consumption, and product throughput is discussed. Results highlight the advantages of the proposed control system application compared to the manual approach.

Keywords: SAG. Sossego. Copper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tela da sala de controle da moagem	17
Figura 2.1 – Processo de compressão	19
Figura 2.2 – Processo de impacto	20
Figura 2.3 – Processo de abrasão.....	20
Figura 2.4 – Relação das regiões internas do moinho com os processos de cominuição.....	21
Figura 2.5 – Regime cascata.....	22
Figura 2.6 – Regime catarata.....	22
Figura 2.7 – Aspecto moinho AG/SAG.....	25
Figura 2.8 – Representação esquemática de um moinho SAG	26
Figura 2.9 – Detalhe da grelha do SAG.....	27
Figura 2.10 – Localização da unidade de Sossego	28
Figura 2.11 – Fluxograma de processo da usina do Sossego	29
Figura 2.12 – Vista aérea da usina do Sossego.....	30
Figura 3.1 – Circuito de Moagem e Rebritagem do Sossego	31
Figura 3.2 – Redução de taxa para ajuste de peso	34
Figura 3.3 – Relação temporal de redução de peso	34
Figura 3.4 – Reduções abruptas de taxa para ajuste de peso	35
Figura 3.5 – Boxplot Taxa Sossego 2017	35
Figura 3.6 – Interface gráfica do simulador da moagem de Sossego no software IDEAS	37
Figura 3.7 – Controlador proposto no padrão ABB	37
Figura 3.8 – Equipe ITV e Sossego reunida no site	38
Figura 4.1 – Teste em modo automático	39
Figura 4.2 – Teste em modo manual	40
Figura 4.3 – Distribuição de peso SAG.....	41
Figura 4.4 – Distribuição taxa nova SAG.....	41
Figura 4.5 – Comparativo de controle de peso.....	42
Figura 5.1 – Taxa do recirculado e nível do silo que alimenta o britador	44
Figura 5.2 – Controle avançado do moinho SAG	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Correlação entre variáveis operacionais SAG	33
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ITV – Instituto Tecnológico Vale

SAG – Semi-autogenous Grinding (Moagem Semi-Autógena)

WI – Work Index

DWT – Drop Weight Test

AI – Abrasiveness Index

JKMRC – Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre

ROM – Run Of Mine

F80 – 80% de material passante na alimentação

P80 – 80% de material passante no produto

PID – Controlador Proporcional, Integral, Derivativo.

PLC – Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Objetivo.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 Resultados Esperados	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Cominuição.....	19
2.2 WI de Bond.....	23
2.3 Moinho semi-autógeno	24
2.4 A unidade de Sossego.....	28
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 Análise da prática operacional	31
3.2 Desenvolvimento do sistema	36
3.2.1 Etapa de laboratório	36
3.2.2 Etapa em campo.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Resultados comparativos entre as operações manual e automático.....	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
5.1 Atendimento aos objetivos	43
5.2 Aprendizados após aplicação do controlador	43
5.2.1 Efeito da rebitagem.....	43
5.2.2 Restrições na taxa	44
5.2.3 Alimentadores e granulometria de material novo	44
5.3 Relevância dos resultados	45
5.4 Sugestões de trabalhos futuros	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de qualquer planta de beneficiamento mineral é o fator primordial para o ganho de produtividade, redução de custos e manutenção da integridade dos equipamentos da usina. Na usina de Sossego, após a lavra é realizado o beneficiamento do minério por meio das etapas de cominuição, classificação, concentração por flotação direta e desaguamento do minério para posterior transporte rodoferroviário. A taxa horária da usina é medida pela massa de minério nova alimentada ao moinho SAG, instalado em um circuito singelo, ou seja, o principal equipamento da usina é este moinho. Inclusive os índices de rendimento da planta são medidos de acordo com a disponibilidade e utilização do SAG. Todas as regulagens feitas nos equipamentos a montante e a jusante ao moinho são realizadas com base a garantir uma maior produtividade do mesmo, com menor custo possível e maior previsibilidade produtiva.

A variação de taxa horária de minério processado em Sossego tem relação direta com a massa indicada na célula de carga do moinho SAG. Muitos são os fatores que podem afetar esta indicação de massa e podem ser subdivididos da seguinte forma:

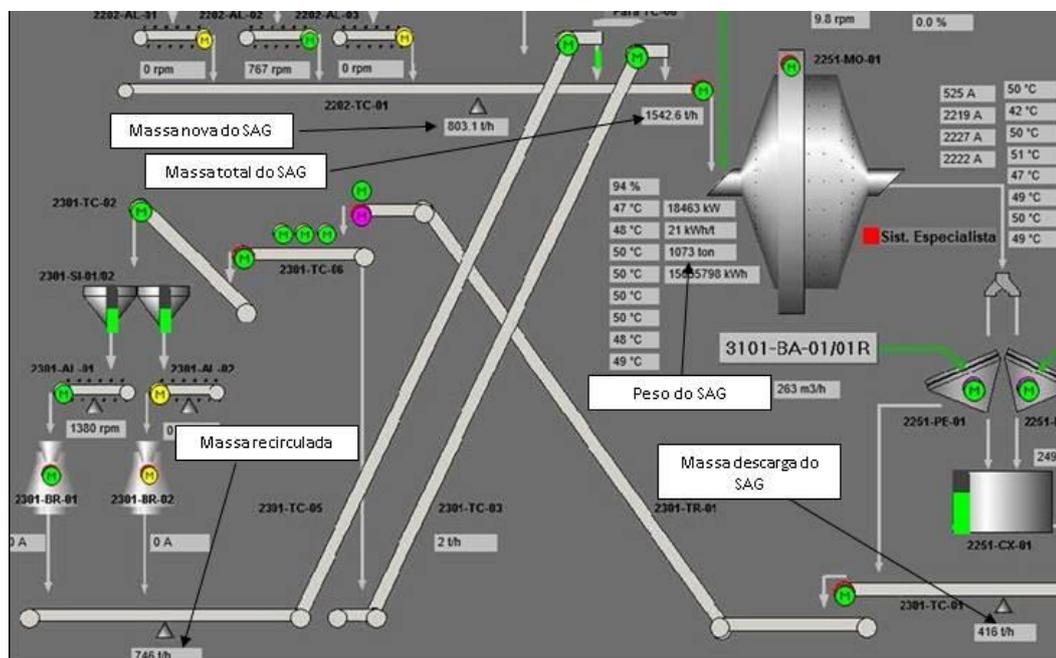
- Fatores mecânicos: Perfil de revestimentos, configuração de grelhas, velocidade de rotação e tamanho do corpo moedor;
- Fatores de processos: Porcentagem de sólidos, taxa nova alimentada ao moinho, taxa de material recirculado, grau de enchimento de corpos moedores e grau de enchimento total (minério + corpos moedores);
 - Fatores do minério: WI, AI, DWT e granulometria de alimentação;
 - Fatores humanos: Demora na tomada de decisão.

Atualmente, a quantidade de material no SAG é controlada pela ação do operador na sala de controle. A estratégia é buscar o máximo de taxa nova de alimentação ao passo em que o peso do SAG é monitorado. Essa estratégia provoca uma variabilidade alta no peso do SAG e sua consequente baixa eficiência. Provoca também um desequilíbrio na retirada de material da pilha pulmão, uma vez que o alimentador central é sempre o mais utilizado por retirar o minério mais fino da pilha. Outra fragilidade dessa estratégia é ser dependente da experiência e conhecimento do operador do turno, ou seja, não há uma padronização da operação.

1.1 Justificativa

Conforme citado anteriormente, a variabilidade da planta e a taxa horária da mesma estão relacionadas diretamente ao peso do SAG. O valor indicado na célula de carga do moinho pode ser entendido como a moabilidade do equipamento. Se porventura o SAG esteja descarregando uma massa pequena e recirculando uma massa alta, haverá uma tendência à elevação do peso do moinho em função da redução da moabilidade. Neste caso o operador de sala de controle precisa reduzir a massa total alimentada ao moinho retirando massa nova. A Figura 1.1 mostra a visão das variáveis disponíveis ao operador de sala de controle.

Figura 1.1 – Tela da sala de controle da moagem



Fonte: Vale, Sistema supervisório Sossego (ABB- knowledge Manager), 2018.

Frente ao modo de operação atualmente aplicado no controle operacional da planta de beneficiamento da mina do Sossego, este trabalho destina-se a realizar uma análise dos efeitos da aplicação de controle automático, pelo ITV, de peso de material em moinho SAG. A aplicação de um modo de operação automático oferece um grande potencial de ganhos relacionados à produtividade e principalmente à estabilidade dos processos das operações unitárias subsequentes.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Elaborar os requisitos para o desenvolvimento de um controlador automático no moinho SAG. Avaliar os resultados da operação com e sem o controlador ativo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o modo de operação atual da moagem SAG da Usina do Sossego;
- Levantar as lacunas e falhas deste modo de operação;
- Reduzir as ações humanas no processo produtivo.

1.3 Resultados Esperados

- Redução da variabilidade do circuito;
- Aumento da taxa média do SAG;
- Redução do consumo energético do SAG;
- Maior disponibilidade do operador para controle de outras áreas do processo;
- Desenvolvimento de uma abordagem diferenciada com possibilidade de aplicação em outras unidades.

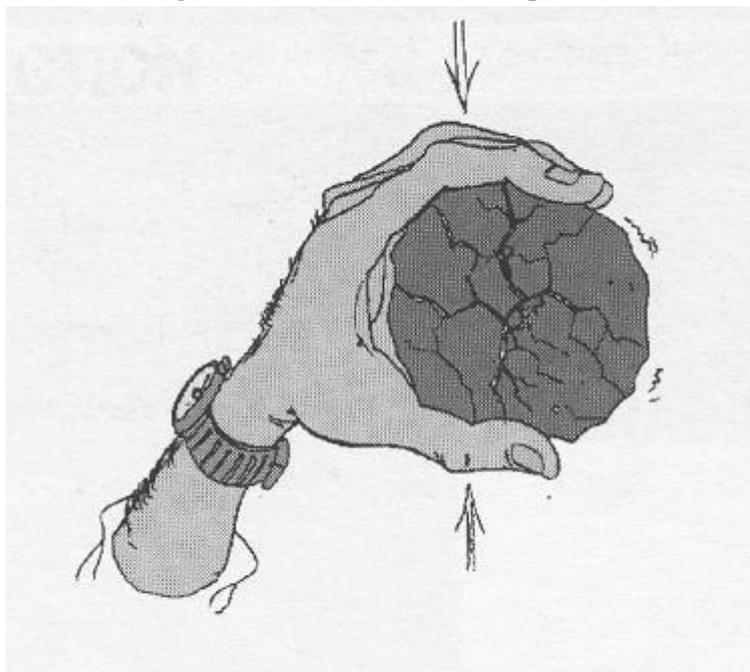
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cominuição

A cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, consiste de métodos específicos para redução de tamanho de partículas através da aplicação de pressão (compressão), criação de impacto cinético entre minério e corpo moedor (impacto), ou através de atrito da superfície de partículas do minério com a superfície dos corpos moedores (abrasão). (OUTOKUMPU I, 2002).

A compressão ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim a força é pouco superior à resistência da partícula (BERALDO, 1987). Esse tipo de fratura é o que ocorre em britadores e produz poucos fragmentos de grande diâmetro (Figura 2.1).

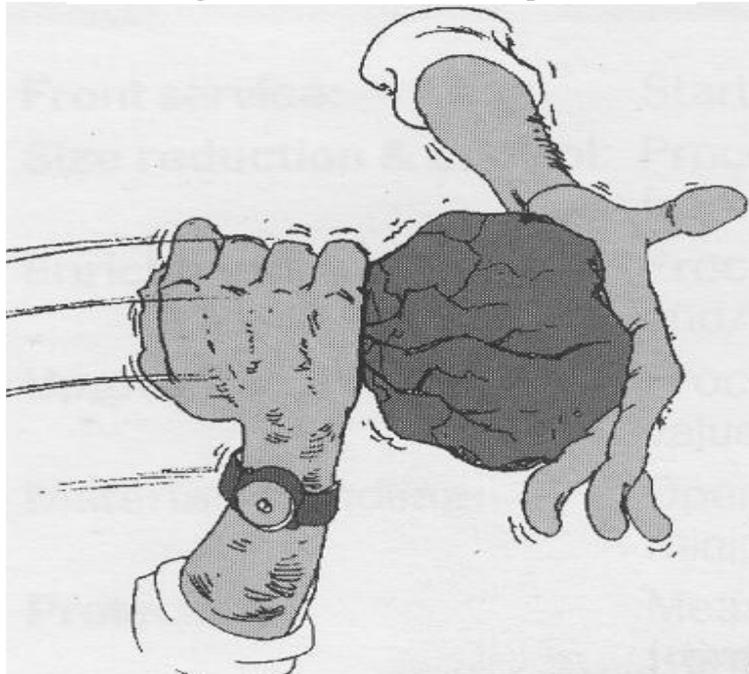
Figura 2.1 – Processo de compressão



Fonte: Metso Minerals, 2002.

Beraldo (1987) continua, impacto acontece quando a força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula. É o tipo de fratura que acontece nos moinhos, na zona de queda das bolas, e gera distribuição granulométrica fina (Figura 2.2).

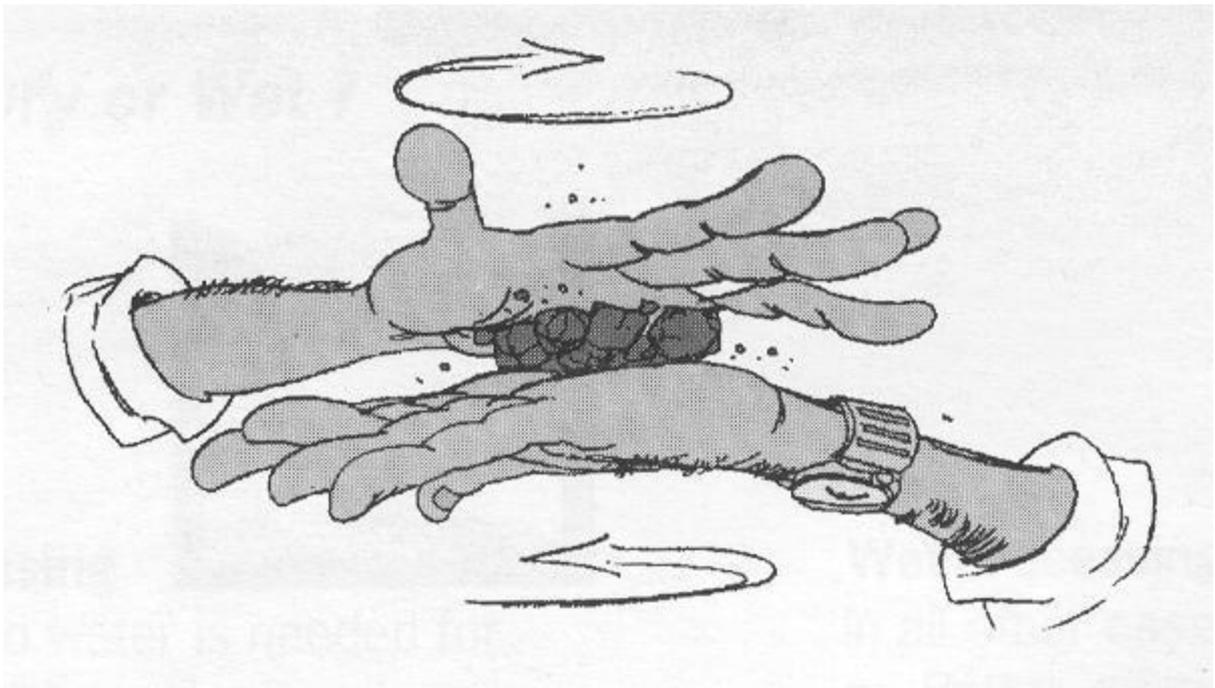
Figura 2.2 – Processo de impacto



Fonte: Metso Minerals, 2002.

A abrasão é o resultado do atrito entre as partículas do minério e entre corpos moedores e partículas; provoca o aparecimento de pequenas fraturas e provoca o surgimento de partículas de distribuição granulométrica fina ao redor da partícula original (Figura 2.3). É um processo com alto consumo de energia. (PEREIRA, 1989)

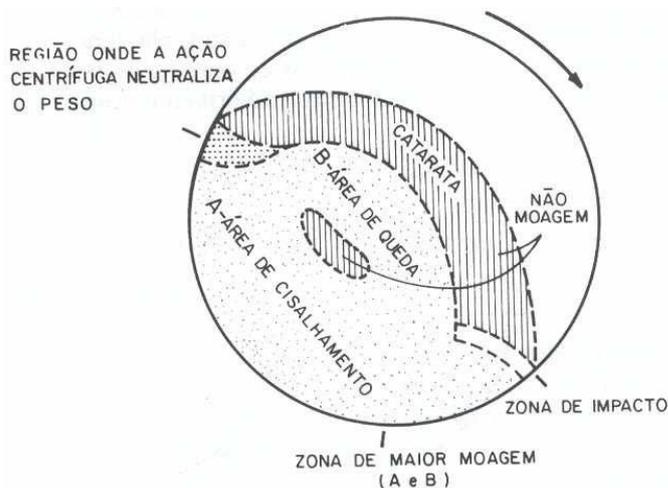
Figura 2.3 – Processo de abrasão



Fonte: Metso Minerals, 2002.

Nos moinhos ocorrem os três tipos de fratura, conforme ilustrado na figura 2.4. Qual dos três processos será o predominante é uma questão que depende das condições operacionais e essa predominância irá afetar a distribuição granulométrica resultante.

Figura 2.4 – Relação das regiões internas do moinho com os processos de cominuição



Fonte: Beraldo, 1987.

Segundo Pereira (1989) o processo de cominuição visa, no tratamento de minérios, gerar uma granulometria adequada para processos subsequentes, sejam eles processos de classificação ou moagem posterior, produzir uma liberação física adequada ou produtos finais acabados.

Os processos de cominuição podem ser feitos a seco ou via úmida dependendo de alguns fatores técnicos e econômicos. Por exemplo, um minério com umidade alta deve ser moído a úmido pois o custo para secagem seria proibitivo. Já um minério extraído de uma região desértica ou muito seca, moído a seco, poderá apresentar vantagens econômicas substanciais. Porém, geralmente, a moagem via úmida apresenta menor custo de investimento e menor custo operacional do que a moagem a seco.

Durante o processo de moagem a variável que regulamenta o tipo de regime dentro do moinho é a velocidade de rotação, que é dada em função da velocidade crítica. De acordo com Beraldo (1987), a velocidade crítica é aquela na qual o corpo moedor consegue atingir o ponto mais elevado do moinho sem se desprender da parede. Condição na qual não se tem realização de trabalho, não ocorrendo moagem.

De acordo com Luz et al. (2010), os moinhos trabalham com velocidades críticas entre 50% a 90% e a escolha desta se deve a condições econômicas e que o aumento da velocidade implica em aumento de capacidade de processamento, mas afeta o desempenho (kWh/t), aumentando o consumo energético.

Durante a operação dos moinhos pode-se observar dois fenômenos com relação à trajetória dos corpos moedores, o regime de cascata (Figura 2.5) e o regime de catarata (Figura 2.6)

Figura 2.5 – Regime cascata

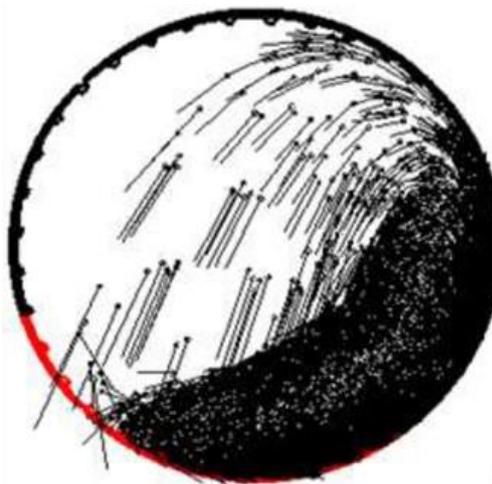


Fonte: Metso Minerals, 2002.

Quando a carga do moinho desliza sobre ela mesma, conforme figura 2.5, Taggart (1951) denominou o regime de moagem como cascata, que se promove devido à baixa velocidade do moinho e um alto fator de enchimento. Neste caso o processo de cominuição predominante é por abrasão e é indicado para produção de uma granulometria fina.

Quando o corpo moedor adquire certa altura e é projetado sobre os outros corpos moedores e a polpa, conforme figura 2.6, denomina-se este regime de moagem como catarata. Neste caso o processo de cominuição predominante é por impacto e é indicado para moagem de materiais mais grossos. A utilização de corpos moedores grandes facilita a fragmentação.

Figura 2.6 – Regime catarata



Fonte: Metso Minerals, 2002.

O JKMRC (1995) estima que 30 a 50 % de toda a energia gasta em uma planta de beneficiamento é consumida na etapa de cominuição, podendo esse valor chegar a 70% para minérios muito “duros”. Segundo Wills (1992), 50% do custo operacional de uma planta é gasto na etapa de cominuição (energia, corpos moedores e operação).

Segundo o JKMRC (1995), 1,5% de toda a energia gerada nos Estados Unidos é utilizada em processos de cominuição (incluindo a energia gasta para fabricação de corpos moedores). Melhorias na eficiência deste processo podem resultar em uma economia de 20 bilhões de kWh por ano. Este valor foi equivalente a 15% de todo o consumo elétrico da Austrália no ano de 1993.

2.2 WI de Bond

O índice de trabalho (WI) corresponde, numericamente, à energia total, expressa em kWh por tonelada curta (907 kg), necessária para reduzir o minério, desde um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 106 µm (FIGUEIRA et al., 2004). O WI corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/t) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria, além de ser um parâmetro importante para o dimensionamento de moinhos de bolas (HERBST et al., 2003).

A lei de Bond estabelece que a energia necessária para fragmentar uma massa unitária de um minério homogêneo é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas (BARRAT & SHERMAN, 2002). A Equação (1) é a expressão matemática da lei de Bond.

$$W = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad [1]$$

Onde:

- W energia em kWh para moer uma tonelada curta do minério;
- WI índice de trabalho (Work Index);

- P80 abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa do produto;
- A80 abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

2.3 Moinho semi-autógeno

Moinhos autógenos e semi-autógenos são moinhos que utilizam o próprio minério como corpo moedor. O dicionário define autógeno como o que faz por si próprio (autos = próprio, genos = produção). Possuem grande relação diâmetro / comprimento.

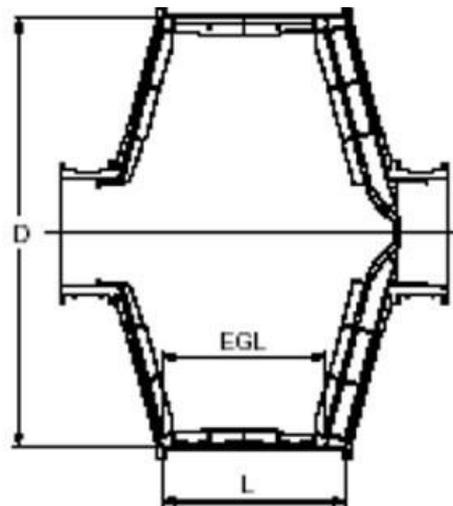
Algumas definições, segundo Jones (2001), se fazem necessárias para que não restem dúvidas ou más interpretações.

Moinho autógeno (AG) – É o tipo de moinho que utiliza o próprio minério como corpo moedor. Para alguns tipos de minério, o moinho autógeno combina as etapas de britagem, moagem grossa e fina. O minério deve conter quantidade suficiente de pedaços competentes para atuarem como corpos moedores.

Moinho semi-autógeno (SAG) – Tipo de moinho que utiliza também bolas de aço, em adição ao próprio minério, como corpos moedores. A adição de bolas (geralmente entre 6 e 12 % de volume e diâmetro de 100 mm ou 125 mm) aumenta a habilidade de um moinho autógeno de tratar minérios de dureza variável e com variação da quantidade de corpos moedores naturais. Um moinho semi-autógeno pode tratar eficientemente uma grande variedade de material de alimentação. Estes moinhos são ideais para a moagem grossa de minérios úmidos para preparar a alimentação para uma moagem final em moinhos de bolas.

A principal característica que diferencia os moinhos AG/SAG dos moinhos de bolas comuns é a relação diâmetro / comprimento que é igual ou maior que 1. Este tipo de característica também é denominada aspecto alto, conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 – Aspecto moinho AG/SAG



Fonte: Bergerman, 2009.

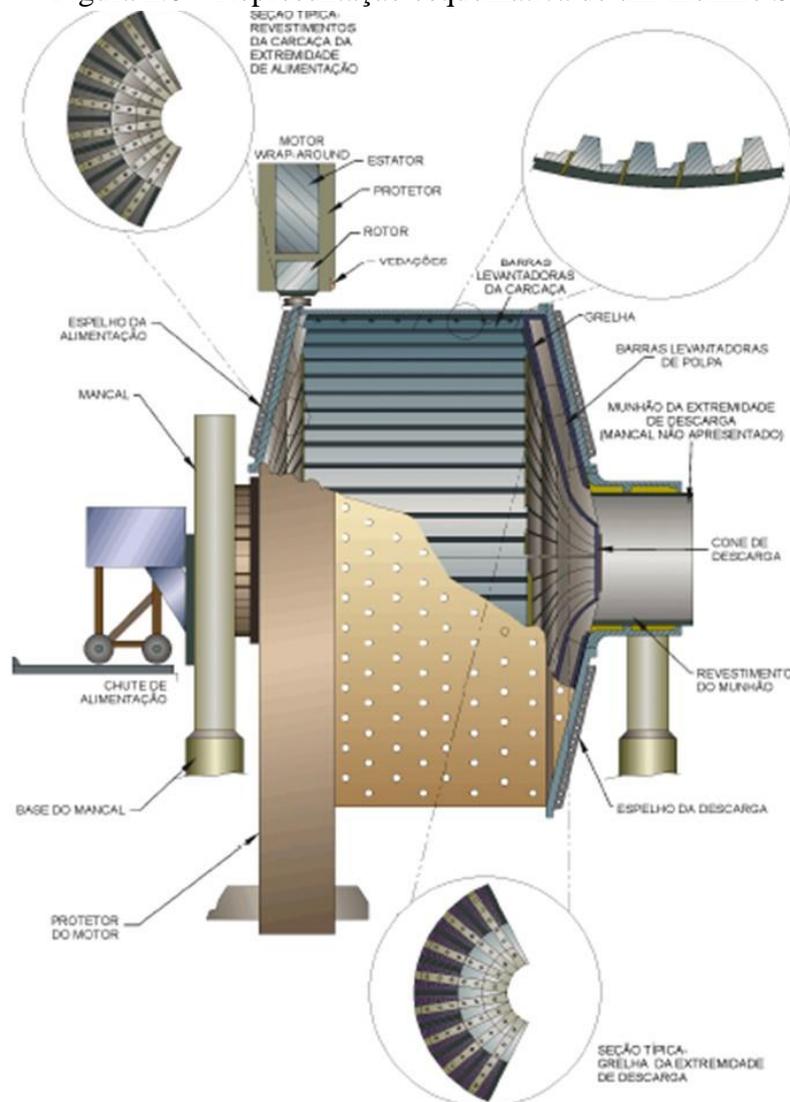
Desde o início de seu desenvolvimento a importância da tecnologia de moagem autógena se estendeu para os dias atuais onde pelo menos 1075 moinhos em pelo menos 64 nações nos 6 continentes operam utilizando pelo menos 300 MW e os fabricantes de moinho têm que atender especificações cada vez mais exigentes, como equipamentos de até 40 pés (12,2 m) de diâmetro, 26 MW (JONES, 2001).

Segundo Turner (1982), a moagem autógena e semi-autógena alcançou reconhecimento mundial como meio de redução de custos de investimento e operacionais e, dessa forma, o uso destes moinhos deve ser estudado em qualquer novo projeto.

Os moinhos SAG geram um produto mais grosso do que os moinhos AG devido à predominância dos processos de compressão e impacto, e menor contribuição do processo de abrasão. Como a abrasão é, dos três processos, o menos eficiente, em termos de energia, vê-se que a moagem SAG tem eficiência energética maior, permitindo que mais massa possa ser atravessada em determinado intervalo de tempo. A moagem semi-autógena tem substituído a moagem autógena, que caiu em desuso e praticamente não é mais utilizada.

O moinho SAG é revestido por placas metálicas a base de aço Cr-Mo (cromo-molibdênio), onde o seu principal objetivo é proteger o casco do moinho. O moinho se divide em três partes distintas: tampa de entrada (alimentação), cilindro e tampa de saída (descarga).

Figura 2.8 – Representação esquemática de um moinho SAG



Fonte: Vale, 2001.

Segundo Mular e Burkertz (1989), a operação dos moinhos deve visar a maximização da vazão de alimentação dos mesmos.

A operação é altamente influenciada pela velocidade de rotação do moinho, pelo tamanho dos corpos moedores, pela granulometria de alimentação, pela carga de bolas, pela carga total (WESTHUIZEN; POWELL, 2006) e pela resistência do minério (MORELL; VALERY, 2001).

Deve-se evitar o choque da carga moedora contra os revestimentos, provocada pela velocidade de rotação do moinho muito alta ou por volumes totais muito baixos, de modo a prevenir quebra dos revestimentos. Para controlar esta variável, além de se conhecer o peso ou a potência que representam o enchimento adequado, deve-se ficar atento ao nível de ruído próximo à carcaça. Caso o ruído seja elevado, deve-se baixar a velocidade de rotação do moinho, nos casos dos equipamentos que possuem motor com rotação variável ou aumentar o enchimento de minério no moinho.

Outro principal fator que afeta diretamente na produtividade de um moinho SAG é a granulometria de produto do mesmo, especificada de acordo com o processo produtivo subsequente. O controle da granulometria de descarga é geralmente realizado por grelhas (Figura 2.9), quanto menor a abertura da grelha menor será a granulometria do produto e, dependendo das características operacionais e do minério, menor será sua produtividade em função do equilíbrio entre vazão de entrada e saída serem diferentes, afetando diretamente o peso do moinho e seu consumo energético.

Figura 2.9 – Detalhe da grelha do SAG



Fonte: Adaptado de Bergerman, 2009.

2.4 A unidade de Sossego

Com sua operação iniciada em março de 2004, a usina do Sossego (VALE-S/A) processa 41.000 toneladas de minério de cobre por dia e está projetada para uma produção em torno de 470.000 toneladas de concentrado de cobre por ano. O empreendimento localiza-se no sudeste do Pará, cerca de 37 km do município de Canaã dos Carajás e à 800 km da capital do estado, Belém. O minério de cobre é exportado por um sistema que integra minas, usinas, ferrovia e porto, Figura 2.10. Após a fase de lavra e processamento, o produto é transportado em vagões através da Estrada de Ferro Carajás até o Terminal Marítimo, em São Luís, Maranhão.

Figura 2.10 – Localização da unidade de Sossego



Fonte: Elaboração própria.

O Projeto Sossego tem dois depósitos principais: Sequeirinho e Morro do Sossego, que estão situados na porção sul de Carajás, ao longo de uma estrutura de cisalhamento regional. O depósito do Sequeirinho consiste em uma única zona mineralizada contínua, de aproximadamente 2000 metros ao longo de sua direção, com mineralização adicional, de menor teor, estendendo-se por mais de 1.000 m, em direção oeste. Por sua vez, o morro do Sossego é parte de uma grande estrutura circular com cerca de 600 metros de diâmetro. O Projeto Sossego possui uma reserva estimada de 250 milhões de toneladas com 0,95% de Cu e 0,27 g/t de Au e 16,5 milhões de toneladas de Cu oxidado.

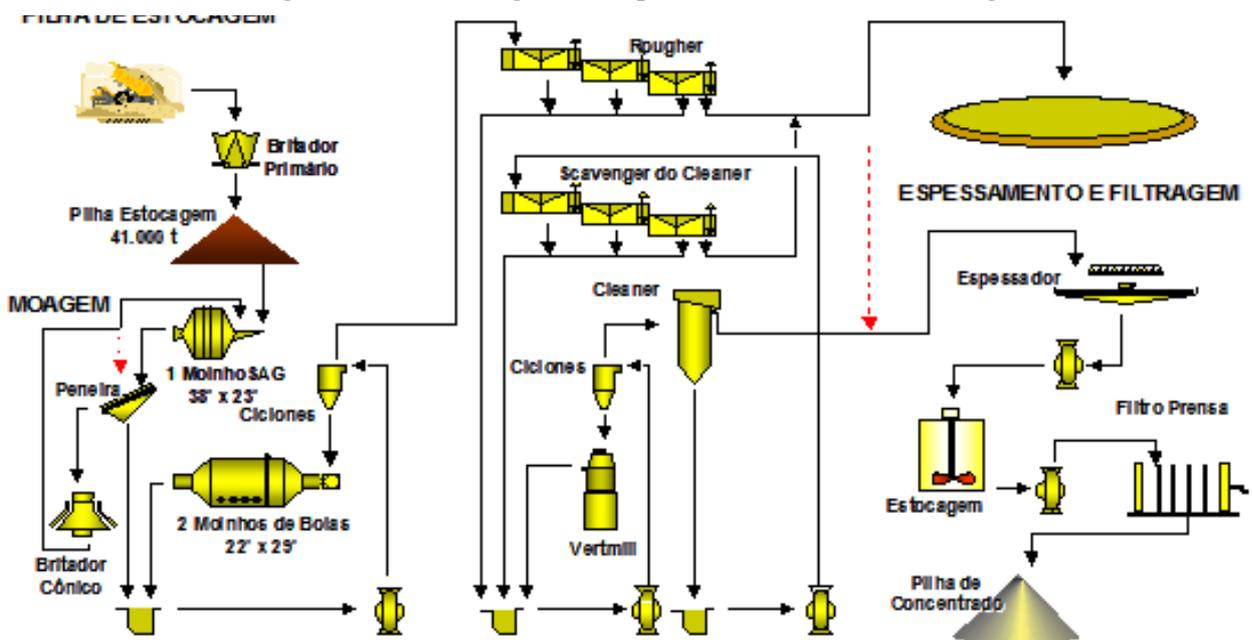
O minério de cobre é basicamente calcopirítico, ressalta-se ainda a pequena presença de bornita e calcocita, sendo que a ganga compreende silicatos e magnetita, além de óxidos e carbonatos em quantidade menores. A mineralização com maiores teores de cobre é encontrada preferencialmente na zona brechada, além de sua disseminação, principalmente, em granitos, gabros, biotita xisto, metavulcânica ácida, actinolitos e magnetitos.

A lavra do minério de cobre, tanto no Sequeirinho e como Sossego, é realizada a céu aberto, com desmonte feito por explosivos. Nesta fase inicial, a usina é alimentada somente com minério do Sequeirinho, posteriormente a proporção será 85% Sequeirinho e 15% Sossego. A usina produz concentrado calcopirítico com teor médio de 30% de cobre, a partir do processamento de 15 milhões t/ano de minério com a média de 1% de cobre.

Após a lavra, o ROM é transportado por caminhões de capacidade de 240 toneladas e alimenta a britagem primária, com tamanho máximo de aproximadamente 1,20 m. Trata-se de um britador giratório com abertura de 167 mm na posição aberta com taxa de 2.500 t/h. O produto britado, com 80% passante em 5 ½ ”, é transportado por uma correia de longa distância (4.045 m) e alimenta uma pilha pulmão cônica de 41.000 toneladas de capacidade útil. Na usina, o minério passa pelas etapas de cominuição (Moinhos e britadores), classificação (Peneiras e ciclones), Concentração (Flotação direta) e desaguamento (Espessamento e filtragem). O rejeito do processo de concentração é disposto na barragem de rejeitos, conforme Figura 2.11.

Como este trabalho está voltado para aumento de performance do moinho SAG o detalhamento de processo se aterá à etapa de cominuição e classificação.

Figura 2.11 – Fluxograma de processo da usina do Sossego



Fonte: Nankran et al, 2007.

O minério é retomado da pilha pulmão por três alimentadores em linha, com velocidade variável e alimentam a moagem semi-autógena (SAG). A moagem semi-autógena opera em circuito fechado com rebitagem do material retido nas peneiras, numa carga circulante média de 25%. A produtividade do SAG é da ordem de 1.841 tbs/h e a sua descarga é realizada por grelhas (3 ¼”), que alimentam duas peneiras vibratórias com abertura de 12,5 mm. Este produto é bombeado para o circuito de classificação, que é constituído por duas baterias de ciclones de (33”), as quais operam em circuito fechado reverso com dois moinhos de bolas, com uma carga circulante na faixa de 300%.

As duas baterias de ciclones são constituídas por 8 ciclones cada, o underflow da ciclonagem alimenta a moagem de bolas, com uma percentagem de sólidos de aproximadamente 75%. Os moinhos têm um F80 na faixa de 2.500 µm e operam com até 30% de enchimento, seu P80 está na faixa de 210 µm. Por sua vez, o overflow da ciclonagem constitui a alimentação da concentração. O overflow apresenta um P80 de 0,210 mm e 40% de sólidos.

A Figura 2.12 mostra a vista aérea das principais etapas unitárias do beneficiamento de minério de cobre de Sossego.

Figura 2.12 – Vista aérea da usina do Sossego



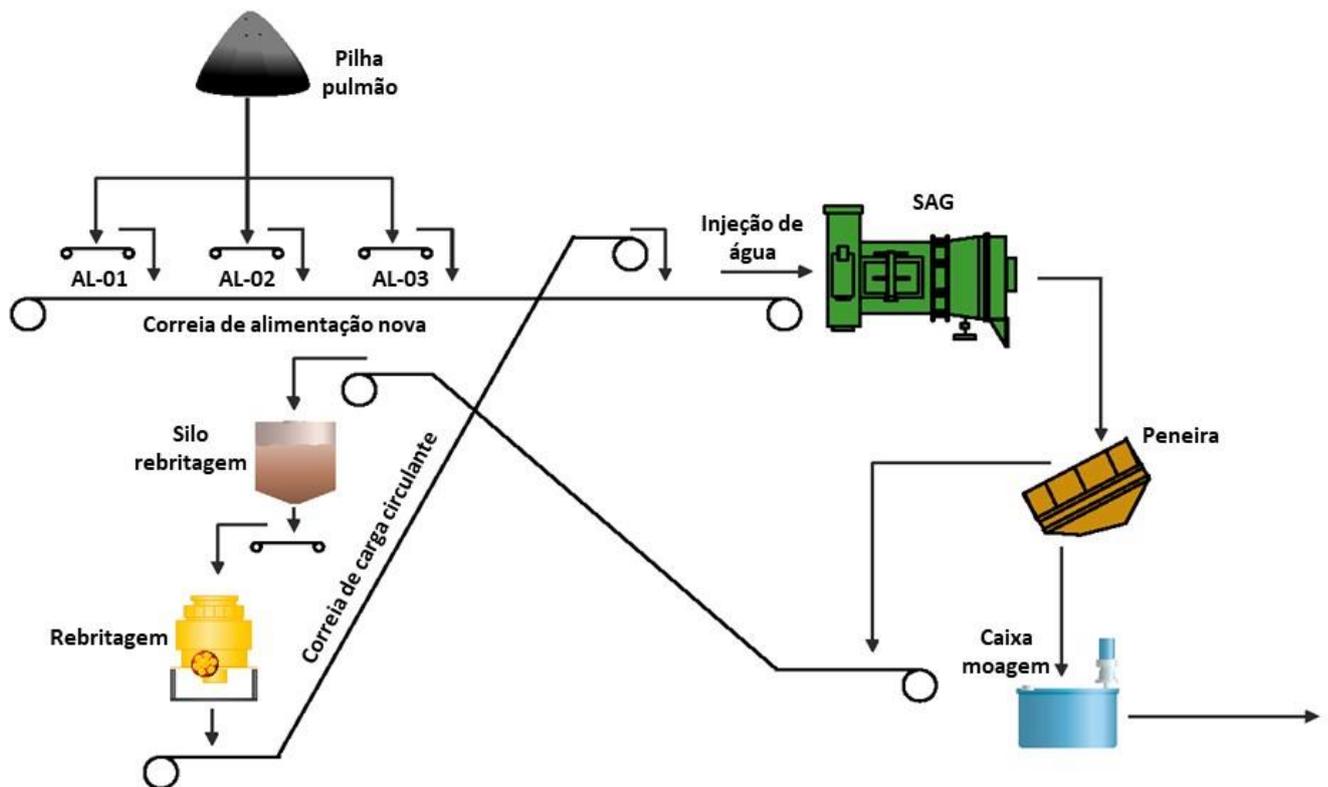
Fonte: Vale, 2018.

3 METODOLOGIA

3.1 Análise da prática operacional

Para se determinar a real necessidade de elaboração de um sistema de controle para a operação da moagem SAG da planta do Sossego, é necessário antes, realizar uma avaliação do modo de operação atual, com foco no circuito SAG e rebitagem (Figura 3.1). Dessa forma é possível determinar nessa avaliação as janelas de oportunidades para que o desenho desse novo sistema pudesse considerar essas possíveis falhas e tentar corrigir ou pelo menos minimizá-las.

Figura 3.1 – Circuito de Moagem e Rebitagem do Sossego



Fonte: Adaptado de Euzébio, 2019.

O peso do SAG depende da taxa de material novo retirado da pilha e da taxa de material do recirculado. Depende ainda da distribuição granulométrica do material, quanto mais

grosso for o minério, maior o tempo de residência dele no SAG. Quanto mais constante for o peso do material dentro do SAG, maior a sua eficiência de operação. Além disso, evita situações de risco, isto é, SAG muito cheio ou muito vazio. Caso o grau de enchimento total se eleve demasiadamente, a altura de queda dos corpos moedores sobre o minério a ser moído diminui e com isso há uma redução da energia de impacto disponível para a quebra das partículas reduzindo assim a eficiência de moagem de partículas maiores. Ao contrário, quando o enchimento total observado indiretamente pelo peso do moinho tende a reduzir muito o seu valor, existe a possibilidade dos corpos moedores (bolas) serem projetados contra uma parte exposta do revestimento do moinho, podendo provocar quebras imediatas ou fadigar internamente os revestimentos, proporcionando um modo de falha por quebra em fim de vida do mesmo.

Atualmente, a quantidade de material no SAG é controlada pela ação do operador na sala de controle. A estratégia é buscar o máximo de taxa nova de alimentação ao passo em que o peso do SAG é monitorado. Essa estratégia provoca uma variabilidade alta no peso do SAG e sua conseqüente baixa eficiência. Provoca também um desequilíbrio na retirada de material da pilha pulmão, uma vez que o alimentador central é sempre o mais utilizado por retirar o minério mais fino da pilha. Outra fragilidade dessa estratégia é ser dependente da experiência e conhecimento do operador do turno, ou seja, não há uma padronização da operação.

Durante a operação não é possível observar diretamente o nível de carga do moinho e por isso esse controle é realizado relacionando esse nível de carga com alguma outra variável que possua correlação direta. Alguns moinhos são operados através do controle pela pressão de óleo nos mancais de sustentação do mesmo, mas esse controle pode sofrer interferências diretas da variação de temperatura e viscosidade do óleo de lubrificação. O moinho SAG da planta de Sossego possui o controle de nível de carga total realizado por células de carga instaladas nos mancais do mesmo, e assim é possível relacionar o peso medido por estas células com o enchimento do moinho.

Outras ações executadas pelo operador que corroboram para a variação de peso do SAG são a injeção de água no moinho e a variação de velocidade de rotação. O aumento destas duas variáveis está ligado diretamente à ação de aumentar o escoamento do material no moinho de modo a reduzir o peso do mesmo.

A efetividade das ações de ajustes nas variáveis de processo pelo operador de sala de controle, com foco em redução de peso do moinho, tem uma dependência enorme da matéria prima alimentada à planta. Conforme varia o WI do minério a moabilidade também varia e consequentemente a efetividade do ajuste de variável de processo também irá variar.

A Tabela 3.1, criada com dados minuto a minuto de início de janeiro/18 a meados de abril/2018 (tempo de uma campanha de revestimento), exemplifica bem o que foi falado nos parágrafos acima. Não necessariamente tem-se uma taxa elevada com elevação do Set Point da mesma. O peso do SAG tem correlação diretamente proporcional ao aumento de Set Point e inversamente proporcional à taxa de massa nova. As ações de manipulação dos alimentadores de retomada do material da pilha pulmão têm relação forte no controle de peso e taxa, sendo o alimentador central (AL-02) o de maior efeito. Com o aumento de rotação do alimentador central a relação com o peso do SAG é inversamente proporcional e diretamente proporcional à taxa. Os dados de uso dos alimentadores reforçam a prática operacional da busca de material fino na pilha pulmão para ajuste de peso e taxa do SAG, a relação do alimentador central com os alimentadores laterais é inversamente proporcional, ou seja, aumenta-se a massa do SAG com material fino proveniente do centro da pilha. Outra análise interessante que a tabela indica é que as ações de aumento de rotação do SAG e o ajuste de porcentagem de sólidos não têm muita efetividade no aumento de taxa e redução de peso do moinho.

Tabela 3.1 – Correlação entre variáveis operacionais SAG

	<i>Set Point Taxa</i>	<i>Taxa SAG</i>	<i>Peso real SAG</i>	<i>Rotação SAG</i>	<i>Sólidos SAG</i>	<i>AL 01 - rotação</i>	<i>AL 02 - rotação</i>	<i>AL 03 - rotação</i>
Set Point Taxa	1,000							
Taxa SAG	-0,358	1,000						
Peso real SAG	0,724	-0,862	1,000					
Rotação SAG	-0,413	0,290	-0,286	1,000				
Sólidos SAG	0,167	-0,250	0,210	-0,220	1,000			
AL 01 - rotação	-0,169	-0,005	0,663	0,032	-0,073	1,000		
AL 02 - rotação	0,495	0,756	-0,720	-0,083	0,290	-0,901	1,000	
AL 03 - rotação	-0,268	0,083	0,657	0,089	-0,310	0,607	-0,859	1,000

Fonte: Elaboração própria, Sistema supervisorío Sossego (ABB- knowledge Manager), 2018.

O acompanhamento da prática operacional pelo autor demonstrou dois comportamentos típicos de ações de redução de peso pelo operador de sala de controle, sendo eles:

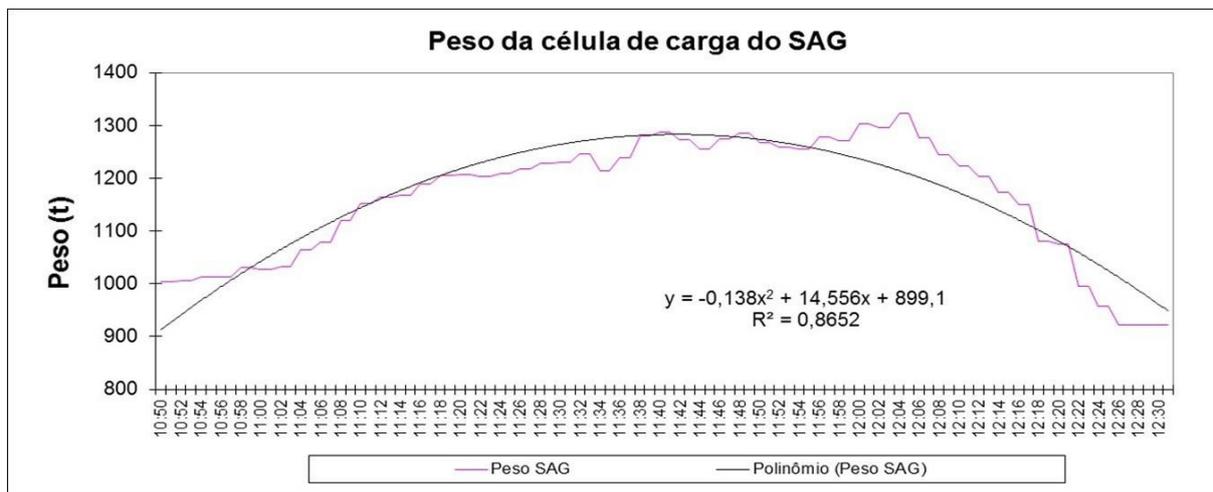
1. Redução gradual da massa nova alimentada ao moinho, após perda de controle do peso: Esta ação gera perda de taxa temporal quase que diretamente proporcional ao aumento do peso, como mostram as Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2 – Redução de taxa para ajuste de peso



Fonte: Elaboração própria, Sistema supervisorío Sossego (ABB- knowledge Manager), 2018.

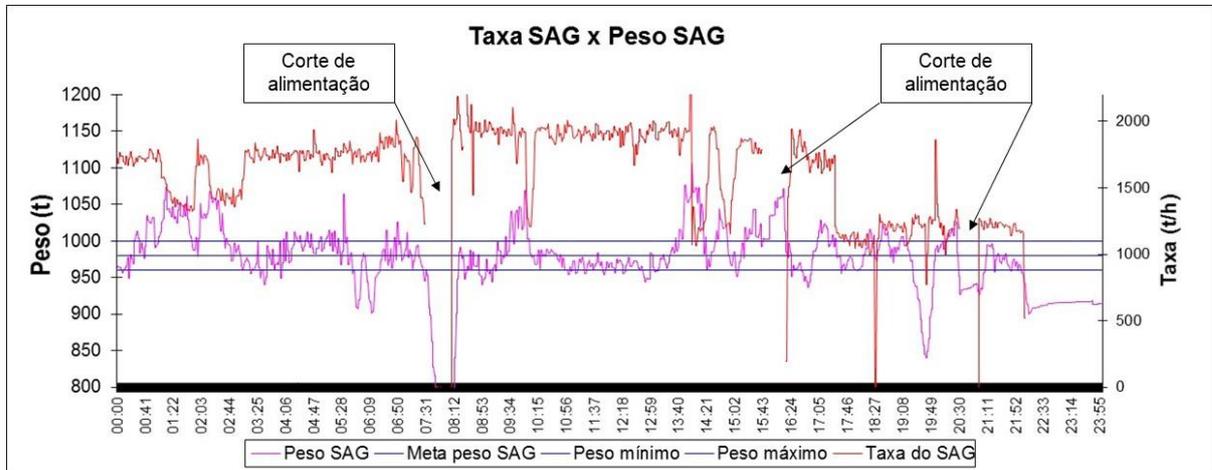
Figura 3.3 – Relação temporal de redução de peso



Fonte: Elaboração própria, Sistema supervisorío Sossego (ABB- knowledge Manager), 2018.

2. Corte abrupto de massa nova para rápida redução do peso (Figura 3.4): Esta ação gera instabilidade nos circuitos a jusante do moinho. Diluindo-os, principalmente o circuito de flotação, gerando perda de recuperação e aumentando o consumo de insumos.

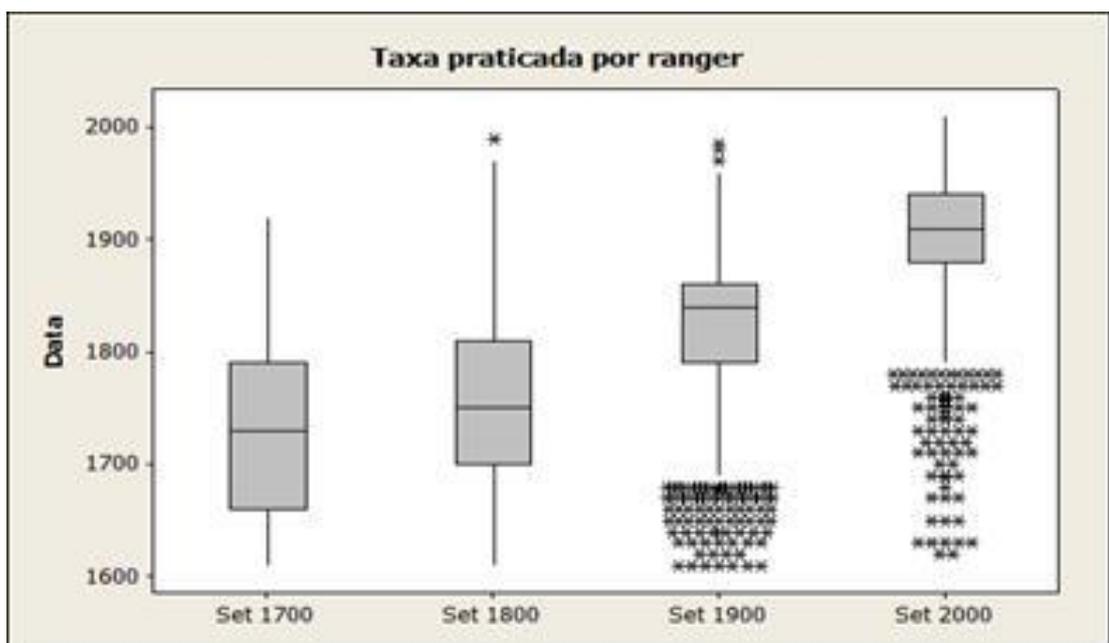
Figura 3.4 – Reduções abruptas de taxa para ajuste de peso



Fonte: Elaboração própria, Sistema supervisorío Sossego (ABB- knowledge Manager), 2018.

Outro estudo que reforça que nem sempre a filosofia de maximização de taxa é a ideal para o processo produtivo de Sossego é o levantamento de dados realizado em 2017 pelo autor deste TCC, onde o boxplot (Figura 3.5) mostra que quanto maior o ranger de set point maior a variabilidade de taxa nova real e maiores as incidências de taxas baixas, com muitas causas especiais na parte inferior do boxplot em SetPoints acima de 1900 t/h.

Figura 3.5 – Boxplot Taxa Sossego 2017



Fonte: Elaboração própria, Sistema supervisorío Sossego (ABB- knowledge Manager), 2017.

3.2 Desenvolvimento do sistema

A proposta do sistema é que o peso seja controlado pela variação automática da taxa da alimentação com base na medição da taxa recirculada e medição da granulometria do material novo vindo da pilha pulmão. O sistema de controle desenvolvido e implementado é do tipo ARC (*Advanced Regulatory Control*) com o uso de blocos de controlador PID em cascata no PLC da ABB.

O desenvolvimento da estratégia de controle foi dividido em duas etapas. A primeira corresponde ao desenvolvimento, pelo ITV, de simulador com base em dados do histórico de operação da planta de Sossego. A segunda etapa corresponde à aplicação prática do controle automático no processo, pela equipe de automação e processos de Sossego e pelo ITV.

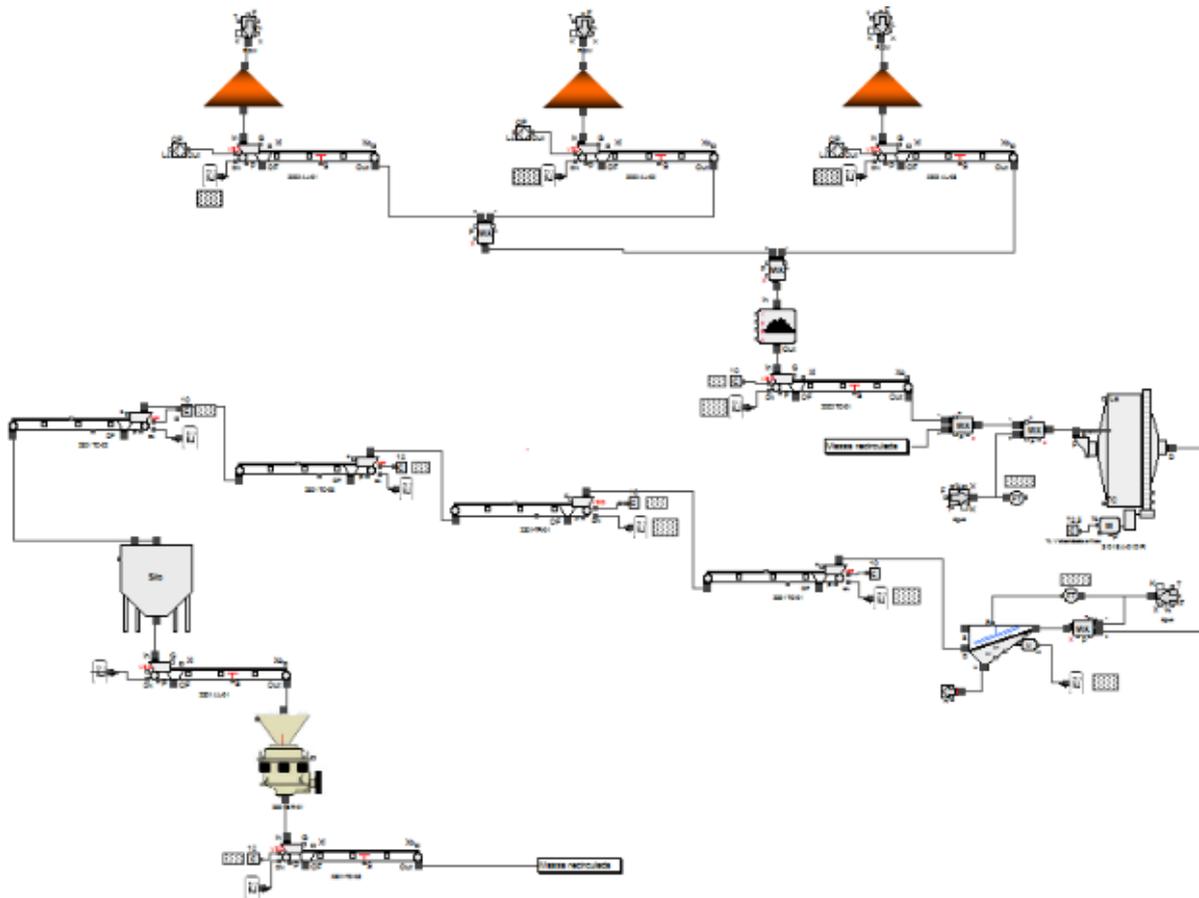
3.2.1 Etapa de laboratório

O ITV desenvolveu o gêmeo virtual (*Digital Twin*) do circuito de moagem SAG e rebitagem de Sossego ilustrado na Figura 3.1. Com base nesse circuito simulado, proposto pelo ITV, foi implementado e testado o controlador proposto. Os testes foram feitos para diversos cenários comuns na planta, em especial, alterações na distribuição granulométrica do minério na alimentação e distúrbios na taxa recirculada.

Em seguida, o algoritmo proposto foi traduzido para o padrão da ABB, fabricante dos equipamentos de controle e automação em Sossego. O PLC ABB do ITV foi utilizado para implementar testes no formato *hardware-in-the-loop*, isto é, o dispositivo da ABB é conectado ao simulador da planta de sossego e controla a planta simulada como se fosse a real. O objetivo é minimizar os problemas que podem existir na transição do controle simulado para o sistema de controle real da usina de Sossego.

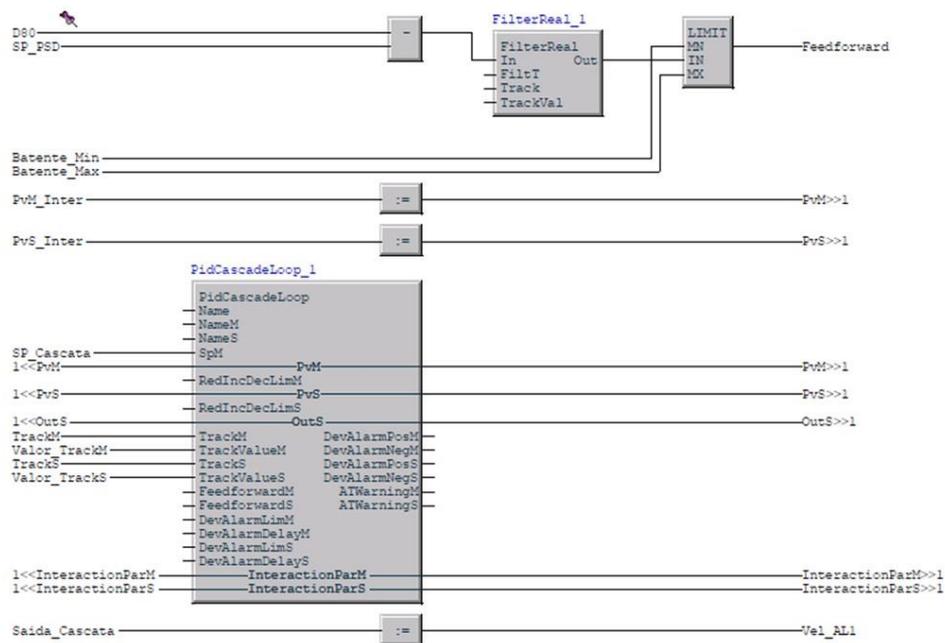
A simulação da usina de Sossego é ilustrada na Figura 3.6. Parte do código do controlador desenvolvido é ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.6 – Interface gráfica do simulador da moagem de Sossego no software IDEAS



Fonte: Euzébio, 2019.

Figura 3.7 – Controlador proposto no padrão ABB



Fonte: Euzébio, 2019.

3.2.2 Etapa em campo

No mês de junho de 2019 foi realizado o download do controlador pela equipe do ITV no sistema de automação da ABB em Sossego. O controlador permaneceu ativo, mas em malha aberta, isto é, lendo as variáveis pertinentes, calculando a ação de controle, mas não atuando a ação proposta no processo real. Durante os meses de junho, julho e agosto foi realizado o monitoramento do comportamento do controlador em malha aberta para avaliação de possíveis ajustes.

Na semana de 23 de setembro de 2019 equipe do ITV retornou ao Sossego para realizar os testes com o controlador em malha fechada. Nos dois primeiros dias trabalhou-se na sintonia dos controladores PID em cascata, o primeiro responsável pelo controle da taxa total de minério no SAG e o segundo responsável pelo controle do peso de material no SAG. No último dia de atividades em Sossego, o controlador atuou por 4 horas seguidas e foi realizada a comparação dos resultados com período similar sob comando do operador humano. A Figura 3.8 ilustra o grupo do ITV e de Sossego reunido para análise e discussão do comportamento do processo com base no histórico de dados dos testes.

Figura 3.8 – Equipe ITV e Sossego reunida no site



Fonte: Euzébio, 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

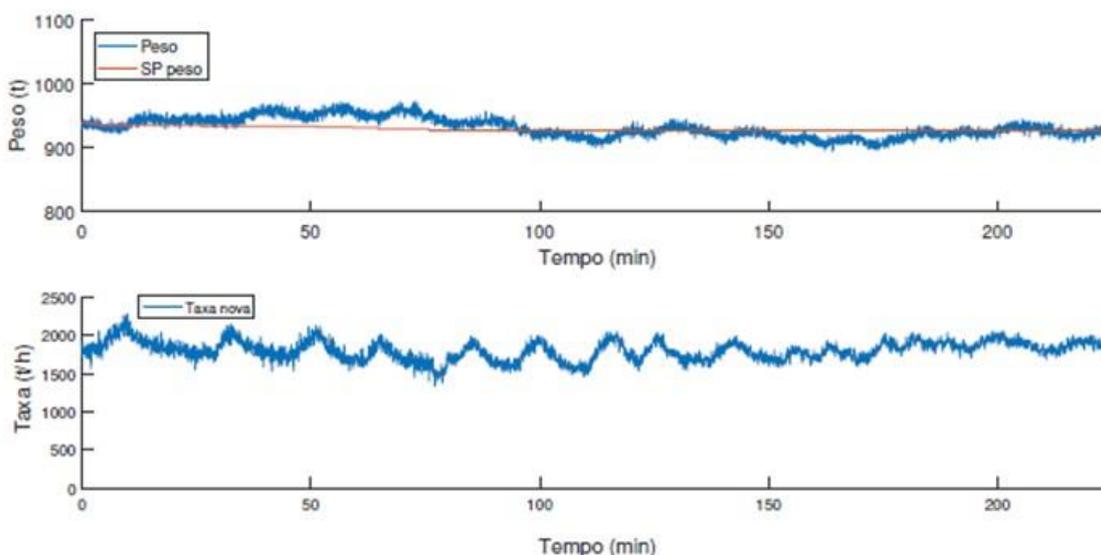
A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do sistema de controle de peso do SAG.

4.1 Resultados comparativos entre as operações manual e automático

Após os ajustes e instalação do sistema especialista foi realizado um teste comparativo, no mesmo dia e com o mesmo minério, de modo a avaliar a efetividade do controlador. Na Figura 4.1 nota-se o efeito do controlador, estabilizando o peso do SAG real próximo ao Set Point de 930 t, a taxa do moinho foi estável ao longo do teste.

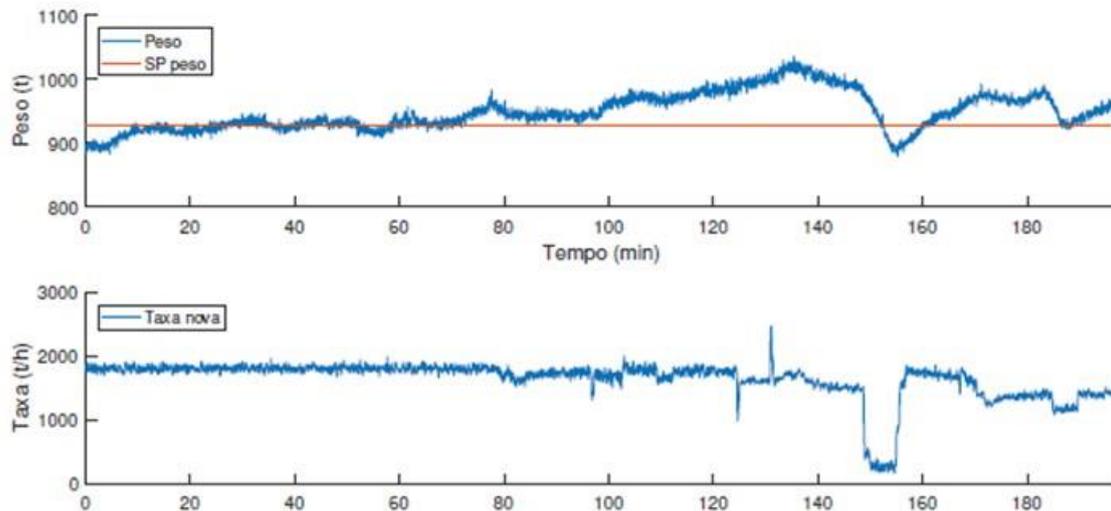
No teste de operação em modo manual, figura 4.2, têm-se um comportamento de taxa muito estável no início, porém com elevação gradual do peso, fato não percebido pelo operador da sala de controle. Esta elevação de peso gradual se refletiu em uma ação abrupta de redução de taxa, o que não foi o suficiente para estabilizar o peso de trabalho nos patamares antes da perda de controle, sendo necessária ações de redução de taxa na tentativa de estabilização do peso. Estes comportamentos gráficos reforçam as análises do comportamento operacional levantadas pelo autor deste trabalho no tópico de metodologia.

Figura 4.1 – Teste em modo automático



Fonte: Euzébio, 2019.

Figura 4.2 – Teste em modo manual



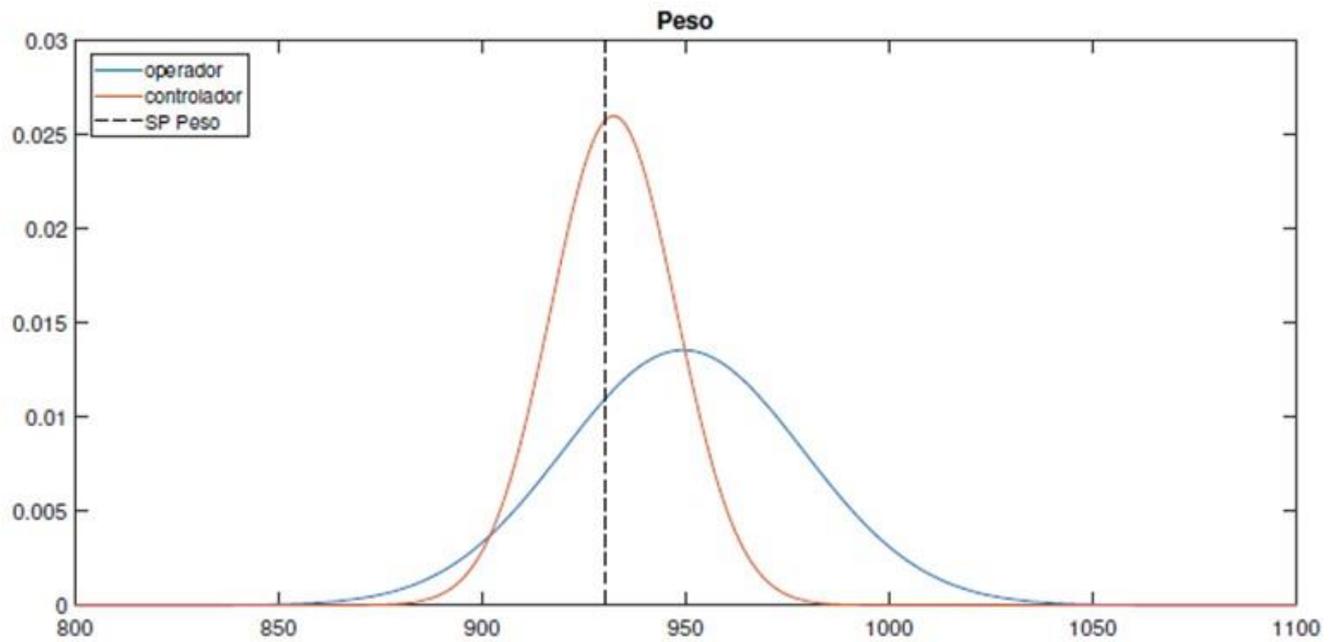
Fonte: Euzébio, 2019.

A curva do peso do SAG teve um desvio padrão de 15,36t sob o comando do controle proposto e um desvio padrão de 29,47t sob o comando do operador no intervalo analisado. A função de distribuição de probabilidade do peso está ilustrada na Figura 4.3 para os dois casos. Pode-se observar que houve uma expressiva redução de 47,88% do desvio padrão do peso no SAG quando utilizado o controlador proposto.

A média de taxa de minério retirada da pilha pulmão foi de 1804,6 t/h sob o comando do controlador e de 1640,24 t/h sob o comando do operador no período comparativo. A produção aumentou em 10,02% com o uso do controle automático proposto. A função de distribuição de probabilidade da taxa está ilustrada na Figura 4.4 para os dois casos.

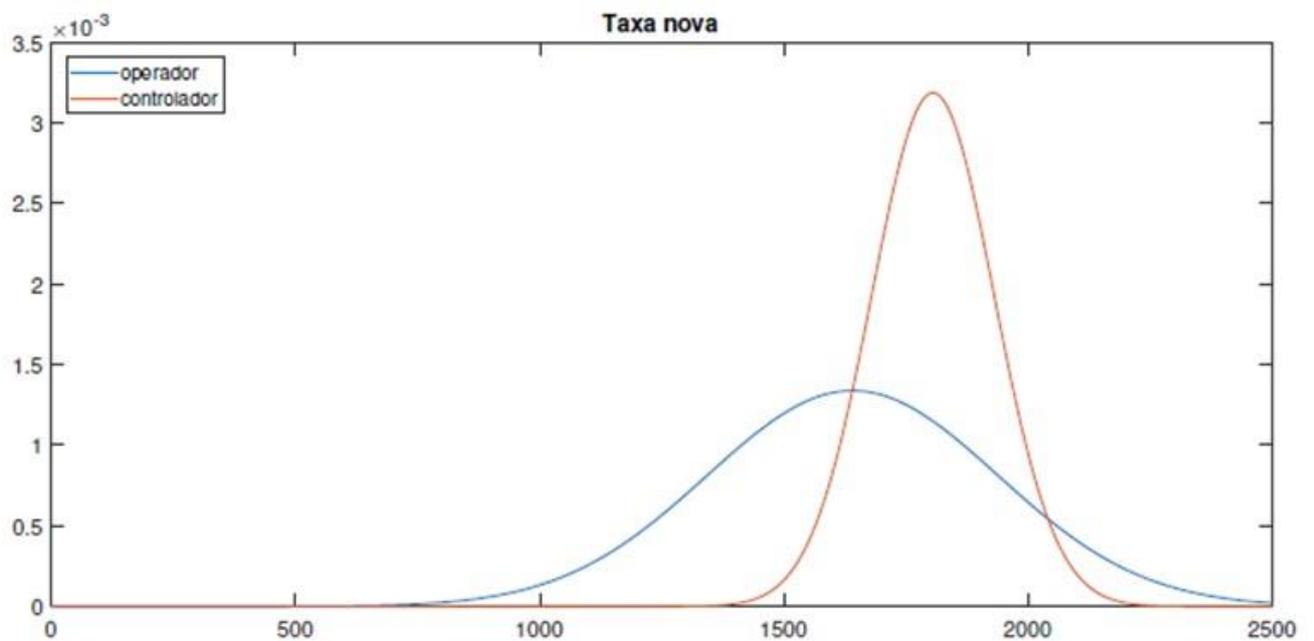
A potência média requerida pelo SAG foi de 15,12MW durante experimento com o controlador proposto. Durante o período com o operador, a potência requerida foi de 15,44MW. O controlador obteve uma redução significativa de 2,07% no consumo energético. Não foram realizados ajustes de rotação no moinho, tanto no modo automático quanto modo manual.

Figura 4.3 – Distribuição de peso SAG



Fonte: Euzébio, 2019.

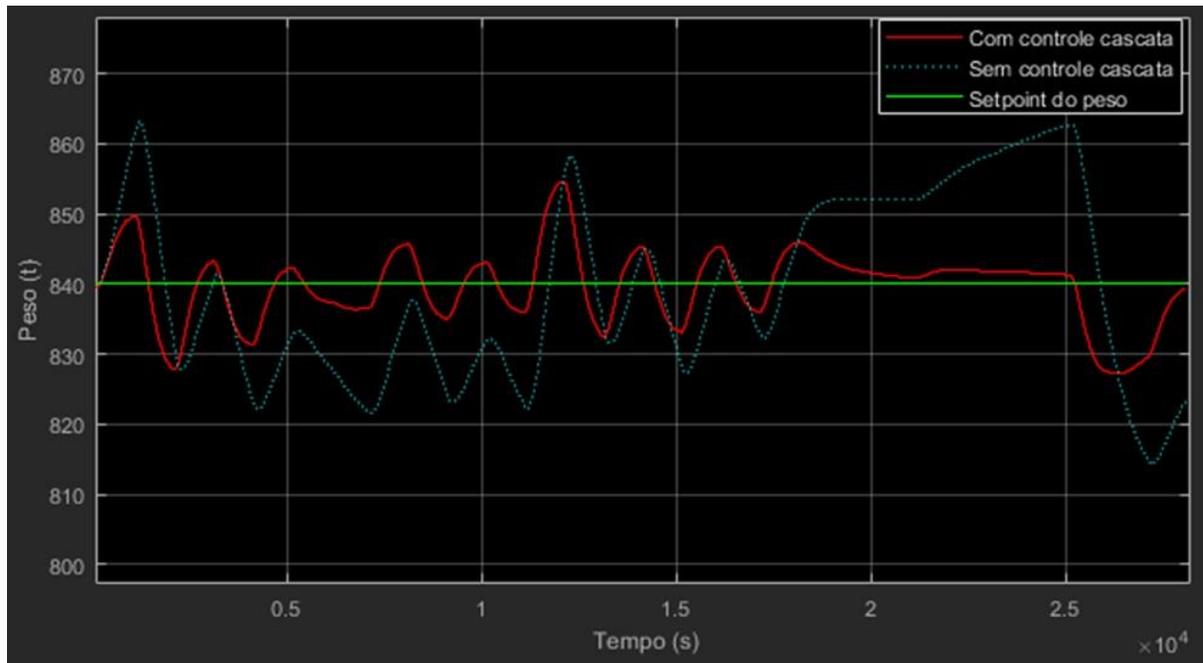
Figura 4.4 – Distribuição taxa nova SAG



Fonte: Euzébio, 2019.

A Figura 4.5 mostra o controlador atuando em um nível de Set Point de peso ainda menor, 840 t, onde o controle de peso se torna mais difícil já que qualquer ruído no circuito pode elevar a variabilidade do peso e por consequência levar o circuito a instabilidade. Este fato é notório ao comparar o moinho com controle cascata e sem.

Figura 4.5 – Comparativo de controle de peso



Fonte: Euzébio, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Atendimento aos objetivos

Todos os objetivos foram atingidos com a implantação do projeto, além de todos os resultados esperados terem sido alcançados.

A etapa de levantamento de dados para criação do sistema especialista, com foco em ouvir e acompanhar de perto os operadores de sala de controle, foi crucial para o sucesso do trabalho. O autor pode dedicar tempo para avaliar o modo de operação da moagem SAG da Usina do Sossego e levantar as lacunas e falhas deste modo de operação. Com a implantação do projeto pôde-se reduzir as ações humanas no processo produtivo, deixando os operadores de sala de controle focados nas demais variáveis de processo da usina. Houve uma redução da variabilidade do circuito, um aumento de taxa média do SAG e redução do consumo energético.

5.2 Aprendizados após aplicação do controlador

5.2.1 Efeito da rebitagem

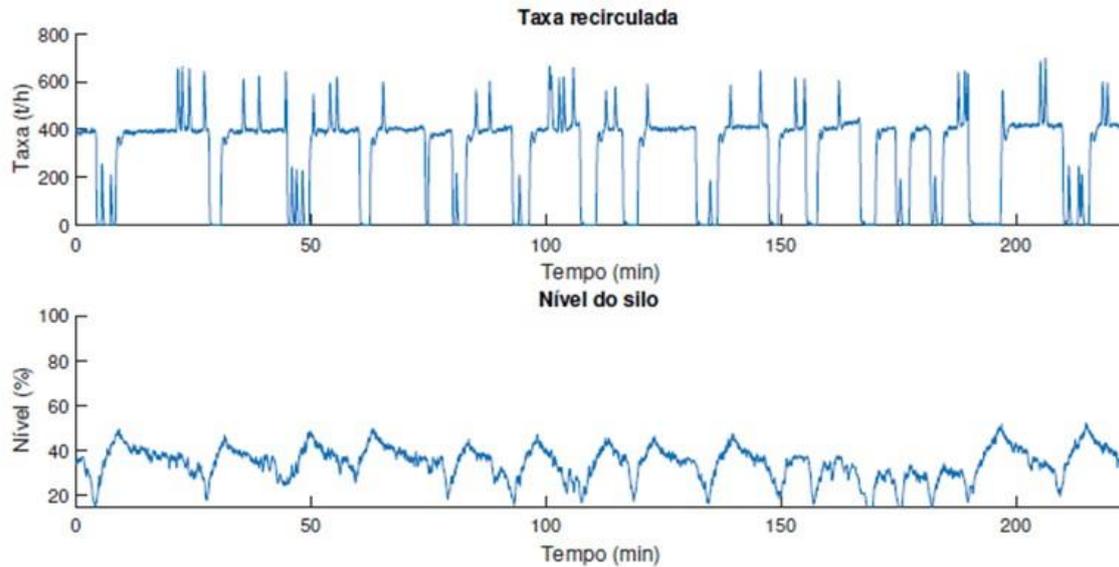
A taxa do recirculado é a maior fonte de distúrbio no sistema de controle do peso do moinho SAG. Esse distúrbio não é diretamente visto pelo operador por ele monitorar a taxa de minério novo retirado da pilha e não o valor de taxa que de fato entra no SAG (soma da taxa nova e taxa do recirculado). Essa variação na taxa de minério que entra no SAG é também responsável pela alta variabilidade na quantidade de material no SAG. A causa do distúrbio no recirculado é a alta frequência de intertravamentos no alimentador do britador. Isso provoca um chaveamento na taxa que alterna entre 400t/h e 0t/h.

Na Figura 5.1 é ilustrada a taxa do recirculado durante o experimento com o controlador proposto. Nota-se que houve 17 intertravamentos do alimentador do britador em um período de 4 horas.

Dado que o religamento do AL depende do operador, uma alternativa sugerida é que o silo possa trabalhar com níveis mais altos, algo em torno de 50% a 60%, o que reduziria o número de intertravamentos por nível baixo. Outra recomendação é que seja verificada a qualidade da medição do sensor de nível na região abaixo de 35%. Nesse ponto de operação há

sempre uma queda abrupta no nível sem que haja uma variação tão grande nas taxas de entrada e de saída do silo.

Figura 5.1 – Taxa do recirculado e nível do silo que alimenta o britador



Fonte: Euzébio, 2019.

5.2.2 Restrições na taxa

Para obter uma redução da variabilidade da taxa retirada da pilha, foi reduzida a agressividade do controlador e adicionou-se restrições de mínimo e máximo na taxa total inserida no SAG. Apesar de essa não ser a melhor estratégia de controle para reduzir a variabilidade do peso do moinho, foi feito desta forma para diminuir a possível resistência dos operadores com o novo sistema implantado. O supervisor na sala de controle de Sossego monitora apenas a taxa retirada da pilha, não há o monitoramento da taxa total (taxa de minério retirado da pilha e taxa do recirculado).

5.2.3 Alimentadores e granulometria de material novo

Como ilustrado na Figura 3.1, são três alimentadores que retiram material da pilha. O do centro retira material mais fino e os das laterais retiram material mais grosso. Uma vez que o controle até aqui desenvolvido estiver ativado, o operador pode contribuir com o sistema de controle ao selecionar quais alimentadores devem estar ativos (material fino – menor tempo de residência no SAG / material grosso – maior tempo de residência do SAG).

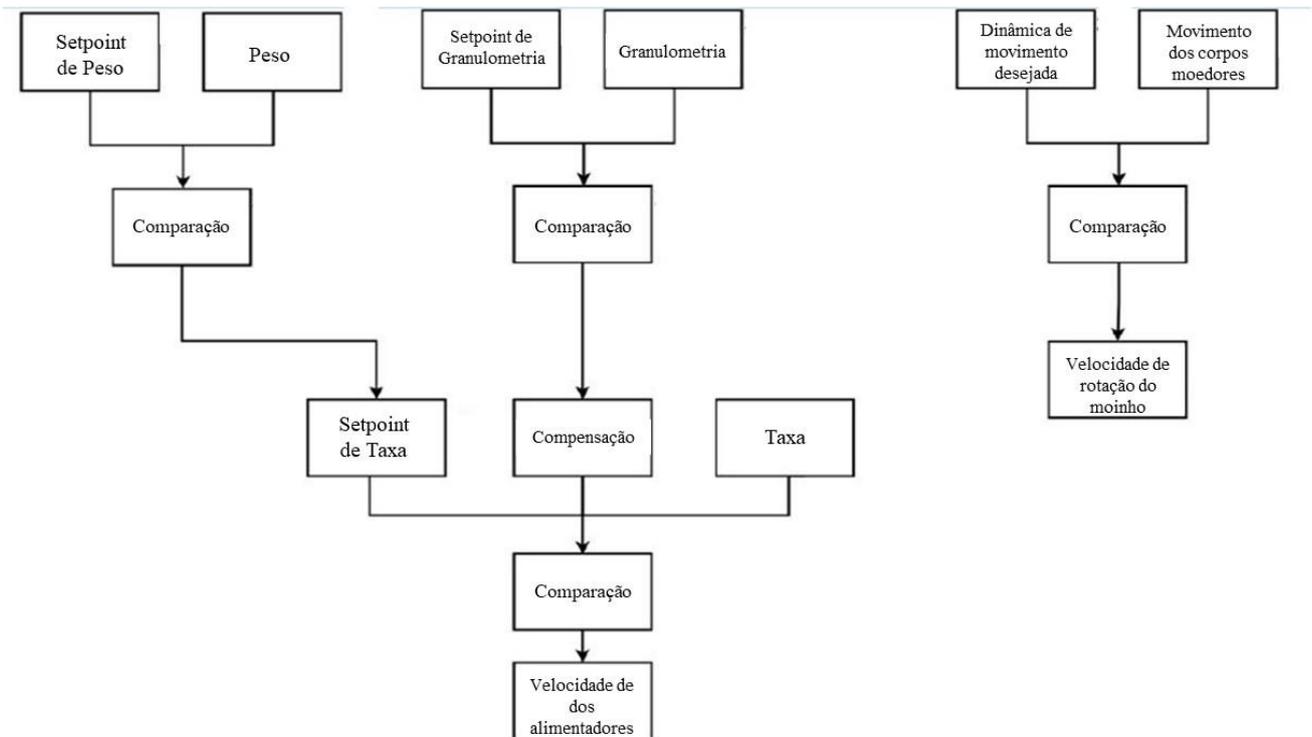
Pretende-se implantar futuramente estratégia que indique quanto deve-se tirar de cada alimentador. Exemplo: tendência de alta do peso, induz redução de taxa e talvez aumento de retirada de material do centro. Tendência de baixa do peso, induz redução de taxa e talvez aumento de uso de material das extremidades. O objetivo é o de aplicar variações sutis e lentas para impedir flutuação forte do peso.

5.3 Relevância dos resultados

A moagem semi-autógena é hoje o estado da arte em moagem. Não se faz um projeto, para beneficiamento de minérios não ferrosos, sem se estudar a alternativa de utilização deste tipo de moagem.

O empenho da equipe envolvida na elaboração deste trabalho levou ao aprimoramento de modelos de controle de moagem com uma gama de possibilidades de aplicações do sistema especialista para moinho SAG. Controlando além do peso, a granulometria de entrada e a dinâmica de moabilidade do moinho. Adequando o processo aos ruídos de forma mais precisa. Conforme Figura 5.2.

Figura 5.2 – Controle avançado do moinho SAG



Fonte: Euzébio, 2019.

A melhoria do modelo levou a equipe a obter a patente, em nome da Vale, de um Sistema e Método Para Controlar Um Circuito De Cominuição Incluindo Um Moinho.

5.4 Sugestões de trabalhos futuros

Controlar o peso do SAG não é tarefa trivial, as perturbações no sistema são desafios tanto para o operador quanto para o sistema de controle automático. O resultado obtido com o controlador proposto foi além do esperado para a simplicidade da estratégia implementada e abriu uma gama de oportunidades de próximos passos de trabalho, sendo os principais:

- Implementar estratégia de controle Fuzzy para regular o percentual exigido de cada um dos três alimentadores. A ideia é balancear a retirada de finos / grossos da pilha pulmão;
- Aplicar *machine learning* para compreender qual é o peso ótimo de material no moinho SAG para os diversos cenários de operação existentes;
- Estudar estratégias de controle possíveis a se aplicar na adição de água no moinho e na caixa do produto de moagem. O objetivo é controlar a densidade da polpa que alimenta os ciclones;
- Adicionar controle *feedforward*: Este controle irá alterar o setpoint do controle escravo a qualquer variação de granulometria. Configura-se assim, uma ação antecipatória. Ou seja, antes mesmo que a variável controlada (Peso) sofra variação devida à perturbação da granulometria, o controle já terá tomado a devida ação.

REFERÊNCIAS

ALVES, V. K. et al. **Estudo de otimização de carga de moinho utilizando tecnologia de simulação.** In: MENEZES, C. T. B. de et al. (Ed.). ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 20. Florianópolis: Unesc: 2004. v. 2, p. 227-234.

BARRATT, D. J.; SOCHOCKY, M.A. **Factors which Influence Selection of Comminution Circuits.** In: DESIGN AND INSTALLATION OF COMMINUTION CIRCUITS, 1982, New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982. p.1-26.

BARRAT, D.; SHERMAN, M. **Factors which influence the selection of comminution circuit.** In: Mular, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.539-565.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares.** 1.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1987. p.1-47.

BERGERMAN, M. G.; MORAIS, J.; CASTRO, A.; ROSA, M. A. N.; DELBONI JR., H. **Variability studies for the Sossego 41 ktpd grinding circuit.** In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONFERENCE, 24th, 2008, Beijing. Proceedings. Beijing: Science Press, 2008. v.1, p. 407-416.

BERGERMAN, M.G. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego.** 2009. 207 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BERGERMAN, M.G.; DELBONI, H.; NANKRAN, M. **Estudo de variabilidade e otimização do circuito de moagem Sag da usina do Sossego.** Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 1, p. 93-97, jan./mar. 2009.

BERGERMAN, M.G.; FONSECA, R.; DELBONI JÚNIOR, H.; DAYRELL, M.; MIRANDA, A., ROSA, M. A. N. **Otimização da ciclonagem de 33" do circuito de moagem do Sossego.** In: XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2011; Salvador, Brasil. p. 895-902.

BOND, F.C. **Crushing and Grinding Calculations.** Parts I and II. Allis Chalmers Bulletin nº 07R9235B. Reprinted from British Chemical Engineering, 1961. p. 13.

BOND, F.C. **The Third Theory of Comminution.** Mining Engineering. Transactions AIME 193, 1952. p. 484-494.

DELBONI JÚNIOR, H.; ROSA, M. A. N.; BERGERMAN, M. G.; NARDI, R. **Optimization of the Sossego SAG mill**. In: ADVANCES IN AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 2006, Vancouver. Proceedings. Vancouver: University of British Columbia, 2006. v. 1, p. I39-I50.

EUZÉBIO et al. **Resultado parcial da aplicação do controle Automático do peso de material no moinho Sag em sossego**, Relatório parcial do projeto OptiPlant, ITV. Minas Gerais, 2019.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M. e LUZ, A. B. **Cominuição**. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios**. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.

FLORES, C. D. **Fundamentos dos Sistemas Especialistas**. In: BARONE, D. A. C. (Ed.). *Sociedades Artificiais: a nova fronteira da inteligência nas máquinas*. Porto Alegre: Bookman, 2003.

HAROLD, L. W. **Basic and advanced regulatory control :system design and application**. 2nd ed. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, United States of America., 2004.

HERBST, J. A.; LO, Y. C.; FLINTOFF, B. **Size liberation**. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). *Principles of mineral processing*. SME, 2003, p.61-118.

JONES, S.M.; FRESKO, M. 2011. **Autogenous and semi-autogenous mills 2010 update**. In proceedings Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology (University of British Columbia: Vancouver).

JKMRC – Julius Kruttschnitt Mineral Research Center. **Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimisation**. Australia. 1995. 413p.

LUZ et al. **Tratamento de minérios**, 3a edição, Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2002.

MENDES, R. D. **Inteligência artificial**: sistemas especialistas no gerenciamento da informação. Ci. Inf. vol. 26 no. 1. Brasília, 1997.

METSO MINERALS, **Basics in Minerals Processing**, USA, 2002.

MORELL, S.; VALERY, W. **Influence of feed size on AG/SAG mill performance**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 2001, Vancouver. Proceedings: SAG 01. Vancouver: University of British Columbia, 2001. v. 1, p. I-203 – I-214.

MULAR, A.L.; BURKERTZ, A. **Automatic control or semiautogenous grinding (SAG) circuits**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 1989, Vancouver. Proceedings: SAG 89. Vancouver: University of British Columbia, 1989. V. 2, p.651-668.

OUTOKUMPU I. **Grinding Technology** [online]. Finland: [cited 4 July 2002]. Available from Internet: <<http://www.outokumpu.fi/mineralprocessing/grind-1b.htm>>.

PEREIRA, C.E., Moagem. In: PERES, A.E.C.; PEREIRA, C.E.; da SILVA, J.M.; DE ARAUJO, A.C. **Curso de Beneficiamento de minérios**. Belo Horizonte: 1989. p. 60-65.

ROSA, M. A. N.; BERGERMAN, M. G.; FONSECA, R. A.; QUEIROZ, A.; GERALDO, J. **Abertura do circuito de moagem da usina do sossego**, In: XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2007; Ouro Preto, Brasil. v. I. p. 123-126.

ROSA, M.A.N., BERGERMAN, M.G., MIRANDA, A., OLIVEIRA, J.L., SOUZA, M., BATISTA FILHO, J., CARDOSO, W. **Controle operacional da usina do Sossego**. In: Meeting of the southern hemisphere on mineral technology e Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Proceedings do VII Meeting of the southern hemisphere on mineral technology e XXII Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. v. III. p. 505-512.

TAGGART, A.F. **Elements of Ore Dressing**. p. 388-433. N.Y.J. Wiley and Sons Inc., 1951.

TURNER, R.R. **Selection and sizing of primary autogenous and semi-autogenous grinding mill**. In: DESIGN AND INSTALLATION OF COMMINUTION CIRCUITS, 1982, New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982. p.474-490.

VALE S.A. **Relatório de viabilidade do Projeto Sossego**. Carajás: Minerconsult, Bechtel, ECM e Concremat, 2001. 451 p. (Relatório interno).

WESTHUIZEN, A.P.; POWELL, M.S. **Milling curves as a tool for characterizing sag mill performance**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 2006, Vancouver. Proceedings: SAG 06. Vancouver: University of British Columbia, 2006. v. 1, p. I-217 – I-232.

WILLS, B.A. **Mineral Processing Technology - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 5th ed., Sidney: Published by Elsevier, p. 275-336, 1992.

WILLS, B.A. **Mineral Processing Technology**. 5th Edition. Oxford: Pergamon Press, 1992. p. 855.