

Controle Fuzzy para o Aumento de Eficiência do Peneiramento no Processamento Mineral

Alexandre G. Fonseca ^{**,***} Thomás V. B. Pinto ^{*}
Kaíke S. Albuquerque ^{***} Robson A. Duarte ^{***}
Thiago A. M. Euzébio ^{*}

^{*} Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG (e-mails: thomas.pinto@itv.org, thiago.euzebio@itv.org).

^{**} Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG

^{***} Vale S.A. (e-mails: {alexandre.gomes.fonseca, kaike.albuquerque, robson.duarte1}@vale.com)

Abstract: Screening is a process that classifies particles by size. The mining industry uses this process by employing vibrating screens, mainly in crushing circuits. The objective is to separate a material stream into two fractions: coarse material (retained) and thin material (through). The coarse material fraction is fed to crushers to be comminuted (reduced particle size). When screening is inefficient, fine particles are carried along with the coarse particles, which overloads the crushing stage, causing productivity losses and even equipment damage. In the literature, it is common to find control works to increase the efficiency of crushers, but there is little about control systems to increase the efficiency of screens. This work presents a fuzzy control solution applied in a screening process formed by ten parallel lines, in a Vale iron ore beneficiation plant, in Canaã dos Carajás, PA. The results indicate an increase of 15.87% in the time in which the screens operate at greater efficiency.

Resumo: O peneiramento é um processo que classifica partículas por tamanho. A indústria de mineração faz uso desse processo por meio de peneiras vibratórias, principalmente em circuitos de britagem. O objetivo é separar um fluxo de material em duas frações: material mais grosso (retido) e material mais fino (passante). A fração de material grosso alimenta os britadores para ser cominuído (reduzido o tamanho de partícula). Quando o peneiramento é ineficiente, finos são carregados junto com as partículas grossas, o que sobrecarrega a etapa de britagem, causando perdas de produtividade e até mesmo danos em equipamentos. Na literatura, é comum encontrar trabalhos de controle para aumento de eficiência de britadores, mas pouco há sobre sistemas de controle para aumento de eficiência em peneiras. Nesse artigo é apresentada uma solução por controle fuzzy aplicada em um processo de peneiramento formado por dez linhas paralelas, em uma usina de beneficiamento de minério de ferro da Vale, em Canaã dos Carajás, PA. Os resultados indicam um aumento de 15,87% no tempo em que as peneiras operam em maior eficiência.

Keywords: Screening; Crushing; Fuzzy Logic; Variability reduction; Efficiency gain;

Palavras-chaves: Peneiramento; Britagem; Lógica Fuzzy; Redução de variabilidade; Ganho de eficiência;

1. INTRODUÇÃO

O peneiramento é um importante meio de classificação utilizado na indústria da mineração. O principal objetivo do peneiramento é classificar as partículas baseado no seu tamanho e formato (Wills e Finch, 2015). Trata-se de uma operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanho diferentes, mediante sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula tem apenas as possibilidades de passar ou de ficar retida. Os dois produtos chamam-se *oversize* ou retido e *undersize* ou passante (Chaves e Peres, 2003). Em suma, os finos são “aceitos” e passam pela malha das telas

(gabarito) e os materiais grossos ficam retidos e seguem para outras etapas.

Segundo (King, 2001), a consideração mais significativa ao avaliar um equipamento de classificação é a incapacidade de realizar uma classificação ótima de um tamanho particular. Mesmo o mais eficiente classificador industrial por tamanho vai permitir a passagem de uma proporção de material *oversize* e vai reter uma porção de material *undersize*. Sendo assim é importante a avaliação e o cuidado com a eficiência de classificação por tamanho.

A capacidade de uma peneira vibratória, principal equipamento utilizado para classificar material mais seco em

tamanho grosseiro, representa sua competência em aceitar e lidar com determinada taxa de alimentação. A suposição mais importante nessa abordagem é que a capacidade de uma peneira é diretamente proporcional à sua área superficial. Sendo assim sua capacidade básica é especificada em taxa de alimentação por hora por metro quadrado de superfície de peneiramento. A capacidade de qualquer peneira é determinada sob condições de operação padrão utilizando um material de alimentação também padrão e predefinido.

À medida que a natureza do material de alimentação e as condições operacionais mudam, a capacidade real da peneira também muda, aumentando para condições menos árduas que o padrão e diminuindo para condições mais árduas que o padrão. Dessa forma teremos um limite de capacidade dinâmico e desconhecido em uma operação real (King, 2001). Uma peneira, operando acima da sua capacidade no momento, classifica com baixa eficiência.

Durante o processo de peneiramento, muitos parâmetros operacionais podem afetar seu desempenho. Esses parâmetros podem ser divididos em parâmetros de máquina ou características de fluxo. Parâmetros de máquina, como as dimensões da tela, material do *deck*, frequência de vibração, amplitude de vibração, e inclinação, dependem da unidade instalada e da estratégia operacional selecionada. As características do fluxo incluem propriedades do material, como a distribuição de tamanho, forma, densidade e taxa de fluxo de material (Asbjörnsson et al., 2016).

Outro aspecto importante ligado ao fluxo do material e que interfere no desempenho e capacidade de peneiramento é sua umidade natural, quando em processo de peneiramento a seco. A umidade da superfície tende a fazer as partículas aderirem e a capacidade de peneiramento é reduzida (King, 2001). Esse efeito tende a aumentar a proporção de *undersize* no retido levando a uma baixa eficiência de peneiramento. Neste cenário, deve-se reduzir a taxa de alimentação da peneira, que leva a uma redução da altura do leito de material, para ajustar o processo à sua capacidade real do momento. Perdas significativas de eficiência no peneiramento provocam um aumento da carga circulante, podendo sobrecarregar britadores e peneiras e restringir a produção.

Em diversas plantas de mineração, devido à alta capacidade requerida, alguns processos como os de peneiramento e britagem são formados por linhas paralelas. Dessa forma, a capacidade das linhas individuais são somadas para que chegue-se à capacidade de projeto definida. Esse é caso em Serra Sul, complexo minerário de ferro da Vale em Canaã dos Carajás, Pará, alvo deste trabalho.

Para casos que utilizam linhas paralelas, como em Serra Sul, equipamentos do tipo transportador de correia com cabeça móvel são utilizados para distribuir o material individualmente e sequencialmente ao longo dos silos de cada linha. Essa tarefa é importante para uma operação mais eficiente, pois tem como objetivo evitar paradas de linhas por nível baixo (falta de material) e paradas do circuito a montante por nível alto em algum silo.

Parada de um linha por nível baixo implica em aumento na alimentação nas demais para manter a produção. Esse aumento de taxa, principalmente em situações de material

de maior dificuldade de peneiramento, resulta em perda de eficiência de classificação. Condições como essa são frequentes em usinas que apresentam grande variabilidade nas características do minério sendo alimentado, como principalmente umidade e granulometria, como é o caso de Serra Sul.

Em suma, existe um limite de eficiência de peneiramento que diminui com o aumento na taxa de alimentação. Esse limite é dinâmico, não conhecido e está associado principalmente, em se tratando de Serra Sul, à umidade natural do minério alimentado. Dessa forma, torna-se essencial manter o maior número de linhas em funcionamento pois resulta em menores taxas individuais das linhas (alimentadores com velocidades mais baixas). Em outras palavras, buscando a menor taxa de alimentação por hora por metro quadrado de superfície de peneiramento, diminuindo a exposição do processo a situações de baixa eficiência de peneiramento por operar acima da capacidade do momento.

Neste trabalho, um controlador *fuzzy* foi projetado para aprimorar a distribuição de minério (balanceamento dos níveis) entre os dez silos do peneiramento secundário da usina de beneficiamento de minério de ferro de Serra Sul. A solução atua variando a velocidade dos alimentadores, visando um melhor balanceamento dos níveis dos silos que alimentam as peneiras. Assim, reduz-se as paradas por nível baixo propiciando um processo com mais área de peneiramento e menores taxas de alimentação nas peneiras. Por consequência, um peneiramento e britagem mais eficientes.

2. CIRCUITO DE BRITAGEM

Circuitos de britagem são comumente utilizados como um estágio de pré-processamento antes da moagem e outros tratamentos para partículas finas na indústria da mineração. Conforme (Hulthén, 2010), circuitos de britagem consistem de um conjunto de máquinas que são colocadas juntas para formar um processo que gradualmente reduz o tamanho do material processado. Os equipamentos geralmente utilizados são:

- Máquinas de redução de tamanho, exemplo: britadores;
- Máquinas de separação por granulometria, exemplo: peneiras;
- Equipamentos de transporte, exemplo: transportadores por correia;
- Armazenamento, exemplos: pilhas ou silos;

2.1 Principais Equipamentos

Nesta seção, os principais equipamentos de um circuito de britagem são descritos. A Figura 1 ilustra os quatro principais equipamentos: alimentador, correia transportadora, britador e peneira. Grande parte do texto e imagens dessa seção são extraídos de Santos et al. (2020).

O alimentador é essencialmente um transportador de minério de curta distância instalado sob pilhas, silos ou moegas. Tem como função remover o material dessas estruturas de armazenamento propiciando um fluxo de material regulado para os equipamentos posteriores do circuito, como por exemplo, transportadores, britadores, peneiras



Figura 1. Principais equipamentos de um circuito de britagem.

ou silos. Em geral, apresentam velocidade variável para permitir o controle de taxa.

Outro equipamento fundamental no processo de britagem e na mineração é o transportador de correia. Ele tem como objetivo a transferência de material continuamente. A correia trabalha sob o efeito da força de atrito. O transportador de correia é composto por uma estrutura simples e de fácil manutenção. Sua capacidade de transferência é alta e a distância é longa.

Já o britador pode ser descrito como um equipamento projetado para fragmentar minério a uma granulometria adequada para a etapa seguinte do circuito. O funcionamento de um britador é periódico, alternando uma ação de quebra e uma ação de abertura. A ação de abertura propicia a descida do material. Uma extensiva revisão de modelos e métodos de controle para britadores é encontrada em (Yamashita et al., 2021).

As peneiras são equipamentos muito utilizados em circuitos de britagem, tendo um papel significativo na eficiência do processo através da boa separação de partículas, entregando para os britadores a fração do material que de fato precisa ser cominuída. Em outras variações de circuito, atuam recirculando o material fora da especificação de tamanho, *oversize*, para ser rebritado e novamente classificado, formando um circuito fechado. O peneiramento é dito “a seco” quando é feito com o material na sua umidade natural (que não pode, entretanto, ser muito elevada) e dito a úmido ou via úmida quando o material é alimentado na forma de uma polpa ou recebe água adicional através de *sprays* convenientemente dispostos sobre os *decks* do peneiramento (Chaves e Peres, 2003).

Por fim, silos de armazenamento são estruturas projetadas para armazenar materiais sólidos a granel. Sua função é formar um estoque intermediário entre duas etapas do beneficiamento mineral. Em geral os transportadores por correia cumprem o papel de trazer o minério de um estágio anterior e armazená-lo lá. Mais tarde, esse material é removido por equipamentos chamados alimentadores, localizados logo abaixo de cada uma dessas câmaras, prosseguindo com a tarefa de processamento mineral (Wills e Finch, 2015).

O processo de peneiramento pode ser dividido em dois subprocessos, estratificação e passagem. No processo de estratificação, as frações finas mudam de posição vertical com as frações grossas que estão localizadas em camadas inferiores (Davoodi et al., 2019). Deslocando as frações

mais finas para a camada mais inferior do leito de material sobre a peneira, dar-se a chance de se apresentarem à tela e passarem através dela, constituindo o subprocesso de passagem ou peneiramento propriamente dito.

2.2 Circuito de Peneiramento Secundário de Serra Sul

O circuito de peneiramento secundário de Serra Sul é realizado a seco, isto é, à umidade natural, o minério é alimentado via três sistemas de transportadores de correia com cabeça móvel dispostos em paralelo. A alimentação tem como origem o peneiramento primário e britagem secundária ou o pátio de regularização. Constituída por três prédios iguais, cada um com dez peneiras vibratórias secundárias do tipo modular para classificação em 19 mm, totalizando trinta peneiras.

A alimentação nova do peneiramento secundário é proveniente do peneiramento primário e britagem secundária ou do pátio de regularização. Cada silo apresenta uma capacidade útil de 1300 toneladas. O minério é retomado dos silos através dos alimentadores de correia e é encaminhado para as peneiras modulares. Os alimentadores tem velocidade variável, no intervalo de 30% a 100%, definida pelo sistema de controle a ser apresentado no tópico posterior.

As peneiras vibratórias modulares utilizadas apresentam 2.440 mm de largura x 9.760 mm de comprimento, sendo cada módulo de 2.440 mm x 4.880 mm, com dois decks. Cada peneira é acionada por dois motores de 45 kW através de inversor de frequência, sendo cada motor responsável pelo acionamento de um módulo.

O material retido no primeiro e segundo *decks* das peneiras modulares (fração maior que 19 mm e fora da especificação de tamanho), segue através de sistemas de transportadores de correia em série para a britagem terciária. Essa etapa é onde estão instalados os britadores terciários do tipo cônico, que são responsáveis pelo processo de cominuição para adequação do tamanho das partículas. O produto dos britadores terciários retorna para a alimentação das peneiras modulares do peneiramento secundário, para serem novamente submetidos ao processo de classificação por tamanho, fechando o circuito.

O material passante no segundo *deck* das peneiras modulares (fração menor que 19 mm), denominada *sinter feed*, é encaminhado através de sistemas de transportadores de correia em série para o pátio de estocagem de produto. O circuito de saída de cada prédio do peneiramento secundário, já com o produto na granulometria correta, é

dotado de um sistema de amostragem de minério, para que as especificações do produto sejam acompanhadas via análises de laboratório. Na Figura 2 temos a representação esquemática das áreas descritas. O peneiramento secundário e britagem terciária são constituídos por três prédios paralelos com arranjos iguais.

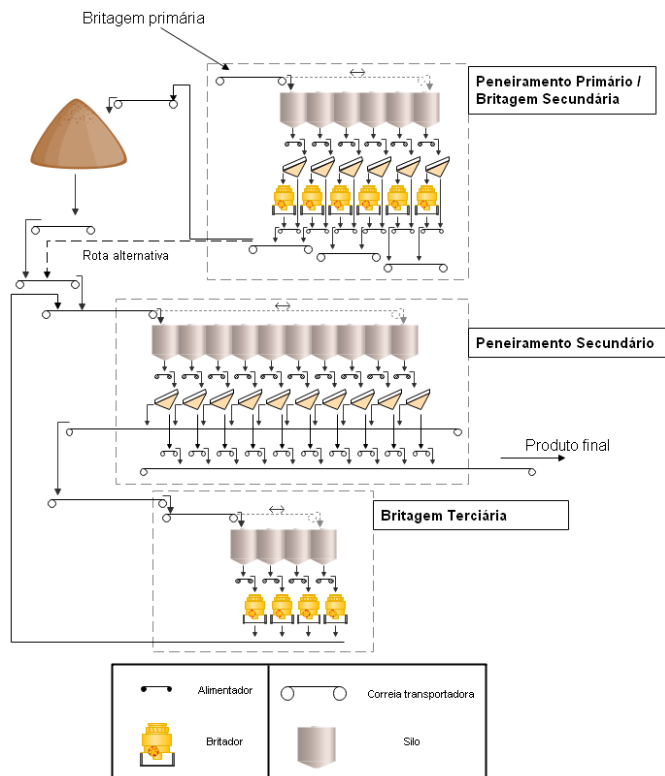


Figura 2. Peneiramento Secundário e suas Áreas de Interface.

2.3 Sistema de Distribuição do Minério

Os transportadores de correia que alimentam os três prédios do peneiramento secundário são equipados com cabeça móvel retrátil, o qual é utilizada para distribuir o minério nos silos, como ilustra a Figura 3. A cabeça móvel se desloca utilizando um sistema de acionamento tipo pinhão-cremalheira e uma unidade motriz independente.

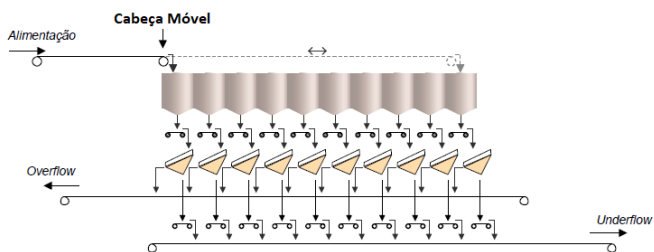


Figura 3. Diagrama do Processo de Distribuição do Minério via Cabeça Móvel.

A velocidade de deslocamento do cabeça móvel é definida através de um algoritmo que considera o nível do silo em questão (silo no qual se encontra o cabeça móvel no instante avaliado) e também os níveis de todos os outros silos

(média dos níveis dos silos). Tem como objetivo buscar a melhor distribuição de minério possível, evitando paradas por nível alto e nível baixo. Seu movimento é contínuo, com velocidade variável e com reversões ocorrendo no centro dos silos das extremidades. Albuquerque et al. (2019) apresentam detalhes de um sistema especialista aplicado ao controle de um cabeça móvel.

3. SISTEMA DE CONTROLE DO PENEIRAMENTO SECUNDÁRIO

Esse sistema é baseado em uma estrutura de controle *override* capaz de identificar automaticamente as principais restrições de processo e regular dinamicamente o *setpoint* de produto ou atuar diretamente na velocidade dos alimentadores. Tem como principais objetivos de controle:

- Oferecer condições de operação seguras reduzindo o risco de sobrecarga nos equipamentos de transporte;
- Promover uma operação contínua e ao mesmo tempo maximizar a utilização da capacidade de processamento disponível, que varia com o tempo. Dessa forma obtendo ganhos de produção e produtividade;
- Manter e regular o estoque de minério nos silos da britagem terciária sempre que possível;
- Balancear os níveis nos silos;
- Regular a taxa de produto na saída do Peneiramento Secundário, sujeito às seguintes restrições:
 - Potência alta no acionamento da peneira (restrição de linha);
 - Nível médio baixo nos silos do Peneiramento Secundário (restrição de processo);
 - Nível médio alto nos silos da Britagem Terciária (restrição de processo);
 - Carga circulante alta proveniente do material retido das peneiras (restrição de processo);

Com tal esquema de controle, mostrado na Figura 4, na ausência de alguma restrição de processo, o valor do *setpoint* do controlador de taxa do produto das peneiras assume o valor determinado pelo operador, que é estabelecido nessa filosofia de controle como sendo o máximo *setpoint* admitido para o circuito. Em caso de ativação de alguma restrição, isto é, alguma variável de processo violar limites estabelecidos, o controlador em questão assumirá a definição do *setpoint* no esforço de regular o processo e permitir sua continuidade operacional na maior taxa de produto possível, sem alcançar os limites de segurança e intertravamento. Esse chaveamento entre as seleções disponíveis, ocorre dentro do conceito da estrutura *override*, no qual o controlador selecionado é o que apresenta o menor valor na sua saída, isto é, a menor CO (*controller output*). Essa tarefa é realizada por um bloco lógico do tipo seletor de mínimo, que tem em suas entradas a CO de cada controlador e o valor máximo determinado pelo operador. Sua saída é simplesmente o menor entre os valores de suas entradas. Os controladores utilizados nesse arranjo são os tão conhecidos e praticados na indústria, controladores PI (proporcional e integral).

Seguindo o fluxo do controle, temos o controlador de taxa de produto do peneiramento, também um PI, sendo responsável pela camada regulatória conforme *setpoint* definido pela estrutura *override* mencionada. Esse controlador, tem como principal particularidade, trabalhar

4. CONTROLE FUZZY PROPOSTO

4.1 Novo Controle do Peneiramento Secundário

Em condições normais de operação, isto é, sem restrição ativa no bloco seletor de mínimo dos alimentadores, os mesmos operam com velocidade igual e definida pela saída do controlador de taxa de produto, cenário esse que supera facilmente 85% do tempo em operação. Com mesma referência de velocidade, a tarefa de equilibrar os níveis dos silos e evitar paradas de linha por nível baixo ou paradas do circuito a montante por nível alto ficam a cargo do cabeça móvel.

Com a nova estrutura de controle aplicada, sinalizada com contorno em vermelho conforme Figura 5, essa função de distribuição de material tem contribuição também dos alimentadores, através do desbalanceamento de suas velocidades. Ao invés dos alimentadores terem a mesma velocidade, alguns alimentadores teriam suas velocidades reduzidas e outros suas velocidades aumentadas, dentro de um contexto de compensação, isto é, a porção de redução de velocidade em alguns alimentadores seriam compensadas no aumento de velocidade de outros. Esse papel é desempenhado pelo controlador *fuzzy*, e em termos de diagrama de controle da saída do peneiramento secundário teremos a aplicação de um ganho na CO do controlador de taxa de produto para cada alimentador.

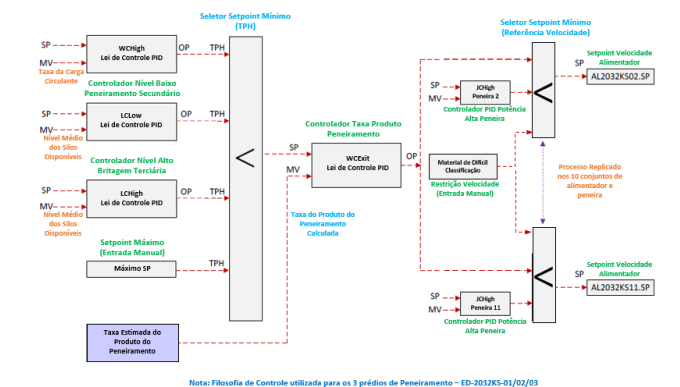


Figura 4. Diagrama de Controle Peneiramento Secundário - Saída.

com uma variável de processo estimada e não o valor propriamente lido do instrumento de medição de taxa, que no caso é uma balança integradora.

O estimador da PV (*process variable*) é utilizado com o objetivo de eliminar o tempo morto intrínseco do processo (distância entre os alimentadores e a balança) proporcionando ao controlador uma sintonia mais agressiva e uma resposta mais rápida no rastreamento do *setpoint*. Essa variável de processo estimada, em termos básicos, é a multiplicação do somatório das velocidades reais dos alimentadores por um ganho e pela porcentagem de carga direcionada ao produto, após partição da peneira. Esse ganho, conhecido como ganho do alimentador, é atualizado dinamicamente e tem seu valor definido pela razão da taxa pelo somatório de velocidade atrasado no tempo (considerando a posição da balança). A porcentagem de carga direcionada para o produto também é calculada dinamicamente.

Avançando no tema, temos a saída do controlador de taxa de produto, CO, conectada em outro bloco seletor de mínimo, sendo esse responsável pela definição de velocidade dos alimentadores, formando outra estrutura *override*. Essa por sua vez, tendo como entradas a CO do controlador mencionado, a CO do controlador de potência alta das peneiras e uma entrada manual utilizada para restringir a velocidade dos alimentadores caso verificado em campo a presença de um material de difícil classificação. Quando temos a referência de velocidade definida pela saída do controlador de taxa de produto, cenário comumente encontrado, todos os alimentadores operam com mesma velocidade, e variam conforme lei de controle.

O controlador de potência alta das peneiras, por sua vez, do ponto de vista operacional, entra em situações de baixa eficiência de peneiramento, percebidas pelo aumento da potência das peneiras causado pelo excesso de *overflow*. Desacelerando o alimentador, regula-se o processo evitando as sobrecargas e baixa eficiência causadas por operar acima da capacidade de peneiramento do momento. Em paralelo à atuação do controlador automático, existe a opção da atuação manual para restringir a velocidade máxima dos alimentadores, praticado geralmente em situações de maior criticidade.

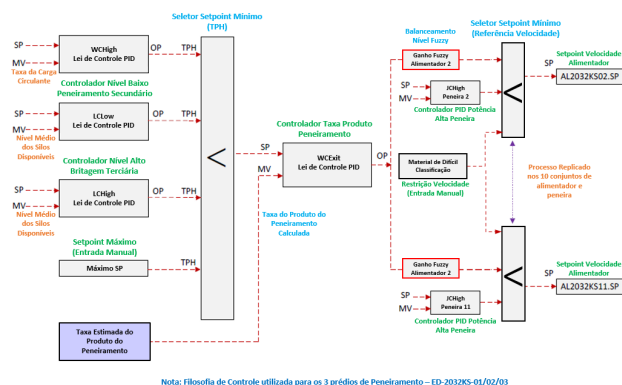


Figura 5. Novo Diagrama de Controle Peneiramento Secundário - Saída.

4.2 A Estrutura Macro do Controle Fuzzy

Esta seção descreve a estrutura macro do controle *fuzzy*, representada pelo diagrama da Figura 6, bem como suas interligações com o controle original. Conforme a Figura 5, o sistema *fuzzy* modificará a referência de velocidade vinda da saída do controle de taxa de produto, podendo esse valor ser amplificado ou reduzido em cada alimentador. Cada linha do peneiramento tem sua própria lógica *fuzzy*, que terá como saída um valor entre 0,01 e 1 representando seu grau de necessidade de aceleração ou desaceleração. Quando mais próximo de zero maior necessidade de desaceleração e quanto mais próximo de um maior a necessidade de aceleração. Essa lógica *fuzzy* trabalha com duas entradas, sendo elas a distância do cabeça móvel para o silo em questão e o nível desse silo.

Agora vamos descrever, em termos básicos, como essas saídas dos blocos de lógicas *fuzzy* alteram de fato a velocidade

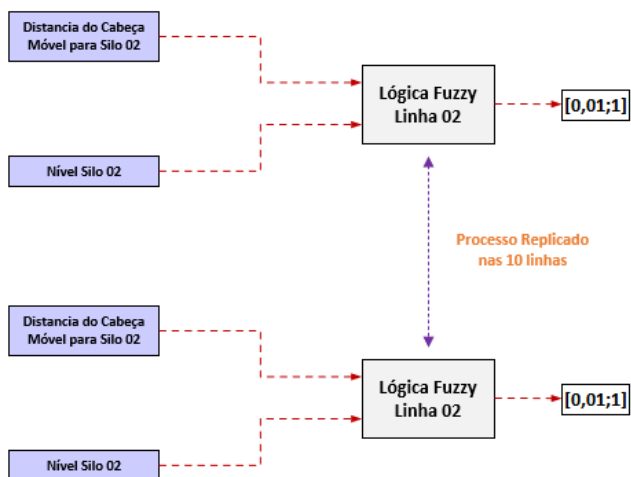


Figura 6. Diagrama Básico Controle Fuzzy Peneiramento Secundário.

dos alimentadores, representação essa na Figura 7. Um bloco lógico foi construído especialmente para tratar esses valores e gerar em suas saídas as velocidades modificadas dos alimentadores. Esse bloco tem, como uma de suas entradas, a saída do controlador de taxa de produto, que é a referência de velocidade dos alimentadores. Essa entrada, é multiplicada pelo número de alimentadores operando, para se obter o que entendemos como somatório de velocidade dos alimentadores em operação. Desse somatório, é separado uma parte fixa e outra parte variável. A parte fixa será dividida igualmente para os alimentadores e a parte variável será entregue de forma proporcional de acordo com a necessidade de aceleração/desaceleração de cada alimentador (saída da lógica *fuzzy*), causando o desbalanceamento das velocidades. Essa técnica foi realizada para que fosse possível, via configuração de um parâmetro, ajustar a amplitude em que o controle *fuzzy* pode desbalancear as velocidades. Quanto maior a parcela fixa menor a amplitude de desbalanceamento e mais equalizadas ficam as velocidades.

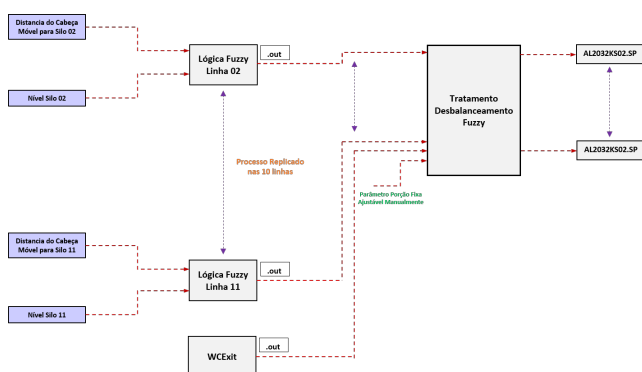


Figura 7. Diagrama Básico Saídas *Fuzzy*.

4.3 Funções de Pertinência Entrada / Saída

Para o projeto do sistema *fuzzy*, formado por dez lógicas *fuzzy*, uma para cada linha, foram selecionadas duas entradas e uma saída. Como entradas, através de observações de processo e análises empíricas, foram definidas o nível do silo e a distância do cabeça móvel para o silo em questão.

Como saída, o indiciador de aceleração / desaceleração. A Tabela 1 representa as variáveis utilizadas no sistema *fuzzy*.

Tabela 1. Variáveis do Sistema *Fuzzy*.

Entradas <i>Fuzzy</i>	Saídas <i>Fuzzy</i>
Nível do Silo	Indicador de Aceleração / Desaceleração
Distância do Cabeça Móvel	

Para definir o conjunto de funções de pertinência de entrada e saída, foi utilizado conhecimento empírico do processo. Variáveis linguísticas foram definidas para as entradas e saída conforme Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis Linguísticas Entrada / Saída.

Nível do Silo	Distância do Cabeça Móvel	Indicador Aceleração
Muito Baixo	Muito Perto	Reduz Muito
Baixo	Perto	Reduz
Normal	Longe	Mantém
Alto	Muito Longe	Aumenta
Muito Alto		Aumenta Muito

O universo de discurso das variáveis de entrada / saída são descritos abaixo:

- Nível do silo: apresenta intervalo entre 10% e 100%, com 10% ocorrendo intertravamento por nível baixo e 100% ocorrendo intertravamento por nível alto;
- Distância do Cabeça Móvel: apresenta intervalo entre 0 e 150 metros, sendo próximo de zero indicando que o cabeça móvel está no silo em questão e próximo de 150 metros que ele está o mais distante possível, isto considerando seu trajeto de ida e volta;
- Indicador de Aceleração / Desaceleração: apresenta intervalo entre 0,01 e 1, sendo quanto mais próximo de zero maior a necessidade de desacelerar e quanto mais próximo de 1 maior a necessidade de acelerar.

Foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais e triangulares, com seus valores definidos empiricamente com base no conhecimento do processo. Na Figura 8 temos as funções de pertinência de nível, na Figura 9 as funções de pertinência de distância para o cabeça móvel e na Figura 10 as funções de pertinência de saída.

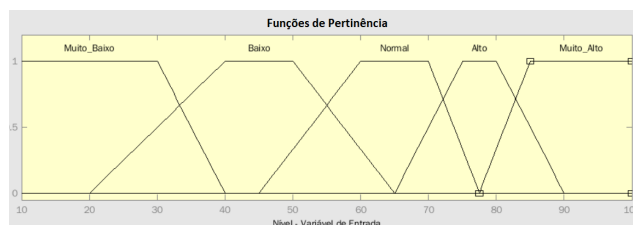


Figura 8. Funções de Pertinência do Nível.

4.4 A Base de Regras *Fuzzy*

O desenvolvimento da base de regras requer informação sobre o processo e experiência do seu comportamento. Associado a esse conhecimento, a base de regras foi construída de acordo com o objetivo do sistema *fuzzy*, que é melhor equilibrar os níveis dos silos para reduzir paradas de linhas por nível baixo e reduzir paradas do circuito a

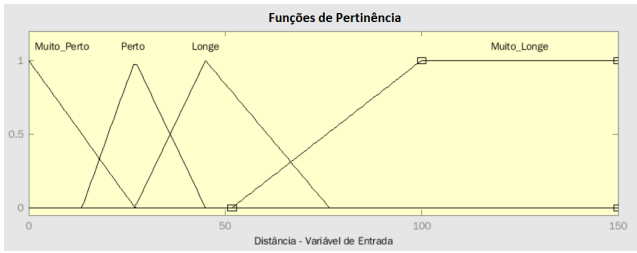


Figura 9. Funções de Pertinência da Distância para o Cabeça Móvel.

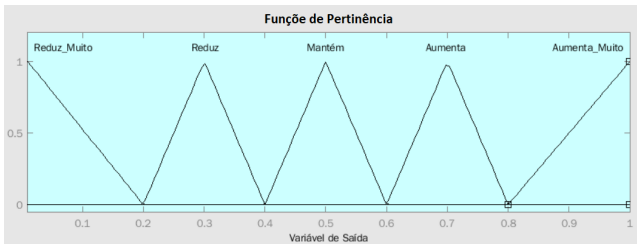


Figura 10. Funções de Pertinência do Indicador Aceleração / Desaceleração.

montante por nível alto em alguma linha. Com as combinações disponíveis das funções de pertinência de nível e distância do cabeça móvel podemos obter 20 regras. Todas as 20 regras foram definidas e são apresentadas na Tabela 3. Analisando as duas entradas *fuzzy* de maneira isolada temos que:

- Nível do silo: quanto mais baixo o nível do silo maior a necessidade de desacelerar o alimentador e vice-versa;
- Distância do Cabeça Móvel: quanto maior a distância do cabeça móvel para o silo em questão maior a necessidade de desacelerar e vice-versa. Isso pois, quanto mais distante o cabeça móvel do silo mais tempo ele levará para ser abastecido de minério;

5. RESULTADOS DA APLICAÇÃO PRÁTICA EM SERRA SUL

Para apuração dos resultados, um teste prático industrial foi realizado. O controlador fuzzy proposto foi implementado em Serra Sul. Mais especificamente na área do peneiramento secundário. Para desenvolvimento da solução foi utilizado o sistema de automação 800xA[®], do fornecedor ABB, já amplamente utilizado no local. Durante todo o mês de janeiro de 2022, o controlador ficou ligado e um comparativo foi feito com o mês anterior, dezembro, no qual o peneiramento estava sem o controlador.

De acordo com a Figura 11, foi verificada uma redução de variabilidade em oito dos dez silos das linhas de peneiramento, silos 02 a 08, com o aumento da concentração dos dados no segundo e terceiro quartil, comprovando um resultado positivo no que diz respeito à distribuição de minério. Apesar de não ter havido redução de variabilidade nos silos 01 e 10, estes obtiveram um valor de mediana maior ao se comparar com o mês anterior. Isto é um resultado positivo, dado que os silos das extremidades costumam ter mais paradas por nível baixo.

Na figura 12 constatamos um ganho no que diz respeito à eficiência de peneiramento. Houve um aumento, em 9 dos

Tabela 3. Base de Regras do Sistema de Inferência.

N	Entradas Fuzzy		Saída Fuzzy
	Nível	Distância	Indicador
1	Muito Baixo	Muito Longe	Reduz Muito
2	Muito Baixo	Longe	Reduz Muito
3	Muito Baixo	Perto	Reduz Muito
4	Muito Baixo	Muito Perto	Reduz Muito
5	Baixo	Muito Longe	Reduz Muito
6	Baixo	Longe	Reduz
7	Baixo	Perto	Reduz
8	Normal	Muito Longe	Reduz
9	Baixo	Muito Perto	Mantém
10	Normal	Longe	Mantem
11	Normal	Perto	Aumenta
12	Alto	Muito Longe	Aumenta
13	Alto	Longe	Aumenta
14	Nomal	Muito Perto	Aumenta Muito
15	Alto	Perto	Aumenta Muito
16	Alto	Muito Perto	Aumenta Muito
17	Muito Alto	Longe	Aumenta Muito
18	Muito Alto	Perto	Aumenta Muito
19	Muito Alto	Muito Perto	Aumenta Muito
20	Muito Alto	Muito Longe	Aumenta Muito

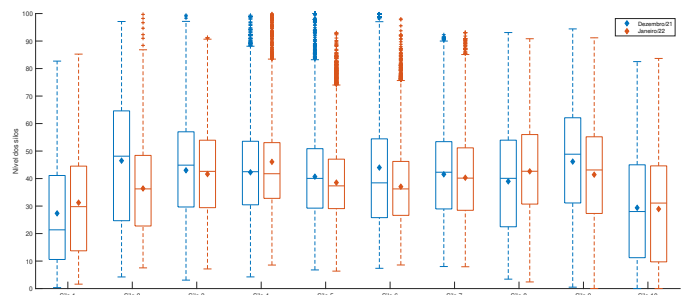


Figura 11. Boxplot para os níveis dos dez silos do peneiramento.

10 alimentadores, da porcentagem de tempo em operação numa faixa de velocidade que favorece a eficiência de peneiramento. Faixa essa considerada entre 30% a 75% da velocidade máxima. O aumento equivale a 15,87% do tempo em operação. Ao garantir maior tempo operando com velocidades mais baixas, reduz-se as condições de baixa eficiência de peneiramento devido à uma sobrecarga de taxa sendo processada pelas peneiras.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentamos a adição de um controle *fuzzy* à estratégia de controle do peneiramento secundário em Serra Sul. Controle esse com o objetivo específico de melhor equilibrar a distribuição de minério nos silos através da manipulação da velocidade dos alimentadores para se obter ganhos no processo de peneiramento.

Ganhos esses que foram comprovados na tarefa de manter mais linhas em funcionamento resultando em taxas individuais mais baixas. Dessa forma tem-se menor exposição

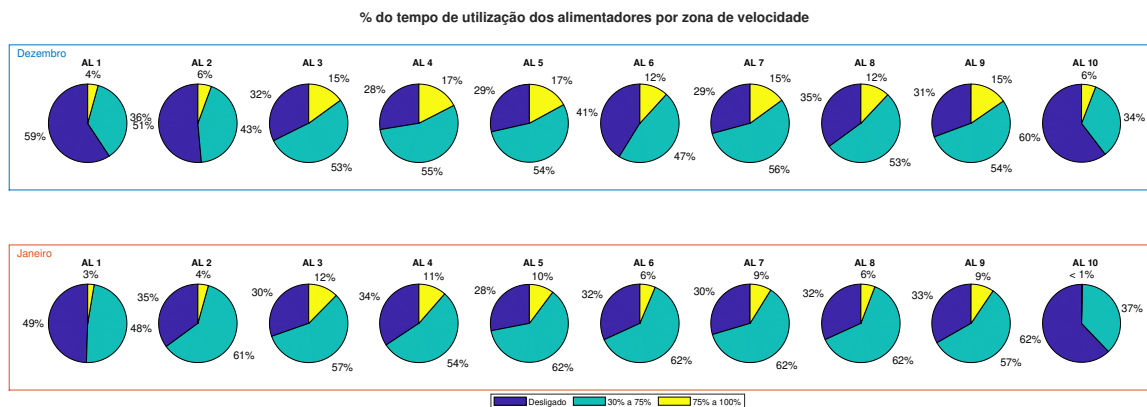


Figura 12. Velocidade dos alimentadores - % tempo em zonas de velocidade.

do processo a situações de baixa eficiência de classificação causadas por sobrecapacidade real.

Os benefícios referentes às paradas do circuito a montante por nível alto em algum silo não puderam ser comprovados devido à dificuldade de isolar a influência do controle diante das outras variáveis do processo.

Outro aspecto importante é a carência de trabalhos de controle voltados para o peneiramento, tornando esse trabalho inovador. Um etapa tão importante para a eficiência da indústria da mineração precisa de mais iniciativas na busca de sua evolução.

Trabalhos futuros poderão considerar também uma controle *fuzzy* multivariável para definir também a velocidade do cabeça móvel, que atualmente é definida por algoritmo simples considerando apenas o nível dos silos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), números 402759/2018-4 e 444425/2018-7; do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, K., Silva, H., Teodoro, E., Fonseca, A., Garioli, G., Lopes, Ê., Cota, L., e Euzébio, T. (2019). Averaging level control of bulk solid material using a tripper car. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 147–152.
- Asbjörnsson, G., Bengtsson, M., Hulthén, E., e Evertsson, M. (2016). Model of banana screen for robust performance. *Minerals Engineering*, 91, 66–73.
- Chaves, A.P. e Peres, A.E.C. (2003). Teoria e prática do tratamento de minérios: Britagem, peneiramento e moagem.
- Davoodi, A., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., e Evertsson, M. (2019). Application of the discrete element method to study the effects of stream characteristics on screening performance. *Minerals*, 9(12), 788.
- Hulthén, E. (2010). *Real-time optimization of cone crushers*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

King, R.P. (2001). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier.

Santos, M.S., Pinto, T.V., Júnior, Ê.L., Cota, L.P., Souza, M.J., e Euzébio, T.A. (2020). Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 94, 103789.

Wills, B.A. e Finch, J.A. (2015). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann.

Yamashita, A.S., Thivierge, A., e Euzébio, T.A. (2021). A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries. *Minerals Engineering*, 170, 107036.