

FRAMEWORK E IMPLANTAÇÃO ÁGIL DE SISTEMAS ESPECIALISTAS*

*Flávio Thimotio da Silva¹
Leonardo de Deus Lucio²
Paulo César Gonçalves³
Arthur Parreira Silva Medeiros⁴
Barbara Bulgarelli Alves de Aguiar⁵
Éric José de Souza Baeta⁶
Juliana Vieira Martins⁷
Laura Carize Fernandes Silva⁸
Thiago Oliveira Rezende⁹*

Resumo

Em um cenário de mercado extremamente competitivo e dinâmico, elevar o potencial produtivo nas plantas em operação se mostra uma estratégia chave, no que se refere à maximização de desempenho e consequente retorno financeiro nos parques industriais. No que concerne às equipes de controle, automação e engenharia de processos, a adoção de Sistema Especialistas para auxiliar na operação de suas plantas, ao passo de se tratar de uma excelente abordagem, oferece também algumas restrições, devido ao tempo e esforço exigidos para se integrar de maneira confiável, tais Sistemas. No método tradicional, pensa-se a longo prazo, com grandes períodos de implantação do Sistema e coleta de resultados ao final. Ao passar do tempo, modificações físicas nos processos podem até inviabilizar a utilização do que fora projetado. O IHM NEBULUZ oferece uma nova abordagem, em que há resolução de partes do problema a cada iteração, com a vantagem de entrega de valor de maneira rápida e sistemática. O fluxo de trabalho consiste em: identificação de oportunidades, modelagem do processo, melhorias no controle regulatório, definição de estratégias de controle avançado, configuração e implantação, seguidos de treinamento para os operadores da planta. Espera-se um prazo entrega do Sistema em operação entre um e dois meses de projeto. Este documento apresenta um caso de sucesso em uma linha de britagem de minério de ferro.

Palavras-chave: Controle Avançado de Processos; Sistema Especialista; Britagem; IHM NEBULUZ.

FRAMEWORK AND AGILE IMPLEMENTATION OF EXPERT SYSTEMS

Abstract

In an extremely competitive and dynamic market scenario, increasing the productive potential at operational plants is shown to be a key strategy, with respect to performance maximization and thus financial return in industrial parks. Concerning the control, automation and process engineering teams, designing Expert Systems to support the operation of their plants, despite of being an excellent approach, it also has some restrictions, due to time and effort that are required to integrate those Systems in a reliable way. In the traditional method, it is generally thought in along-term scenario, with long periods of time to implement the System and collect the results in the end. As time goes by, physical changes in the processes can invalidate the use of what was designed. The IHM NEBULUZ provides a new approach, in which parts of the problem are resolved at each iteration, with the benefit of

delivering value in a fast and systematic way. The workflow consists of: identification of opportunities, process modelling, regulatory control improvement, definition of advanced control strategies, configuration and implementation, followed by training of the plant operators. It is expected a period that ranges from one to two months of project to deliver the System. This document presents a case of success in a crushing line of iron ore.

Keywords: Advanced Process Control; Expert System; Crushing; IHM NEBULUZ.

- ¹ *Mestre em Engenharia de Minas e Metalurgia, Engenheiro de Controle e Automação, Líder de Otimização de Processo, Digital Industry, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ² *Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Projetista de Sistemas de Controle, Automação, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Industrial Mecânico, Especialista em Gestão da Produção, Engenheiro Master, Gerência de Operação Pico e Expedição Vargem Grande, Vale S/A, Itabirito, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Químico, Analista de Sistemas de Controle, Digital Industry, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁵ *Engenheira de Controle e Automação, Mestre em Engenharia Química, Analista de Sistemas de Controle, Digital Industry, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Eletricista, mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Controle e Automação de Processos, Engenheiro Pleno, Gerência de Automação Corredor Sudeste, Vale S/A, Itabirito, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁷ *Engenheira de Controle e Automação, Engenheira de Controle de Processo, Digital Industry, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁸ *Graduanda em Engenharia Mecatrônica, Estagiária de Sistemas de Controle, Digital Industry, IHM Stefanini, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁹ *Engenheiro de Controle em Automação, Supervisor de Engenharia de Automação do Complexo Vargem Grande, Gerência de Automação Corredor Sudeste, Vale S/A, Itabirito, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Quando se trata de controle de processos industriais, as equipes que controlam efetivamente a planta lidam com um grande volume de informações em tempo real que são apresentadas de formas complexas, porém nem sempre estruturadas, desconsiderando o impacto sistêmico de todas as variáveis envolvidas no processo. Situações como esta dificultam a tomada da melhor decisão possível no momento mais adequado com o objetivo de maximizar o desempenho da planta em um ambiente que sofre com constantes mudanças físicas de processo e operacionais.

Com o intuito de otimizar indicadores-chaves de processo como eficiência, qualidade e segurança, Sistemas Especialistas são vastamente implantados em cadeias produtivas justamente por permitir um grau maior de flexibilidade, padronização, celeridade e previsibilidade das decisões mesmo sob incertezas variadas envolvidas. Esses Sistemas são constituídos por um programa ou um conjunto de programas computacionais que usa a representação do conhecimento ou perícia humana de modo a executar certas funções semelhantemente às realizadas por um especialista humano naquele domínio específico, aliado à lógica *fuzzy* (nebulosa), uma lógica multivariável capaz de absorver informações abstratas, normalmente descritas em uma linguagem natural (línguas faladas ou escritas), e convertê-las para um formato numérico [1]. O Sistema Especialista nebuloso, como é denominado, é uma ferramenta poderosa, completamente compreensível e apropriadamente interpretado pelo usuário para resolver esse problema.

Porém, independente da estratégia ou tecnologia adotada para implantação de controle avançado, ter o bom funcionamento do controle regulatório é primordial para garantir o sucesso do projeto. Deve-se reservar parte do tempo na inspeção das malhas de forma a avaliar e definir mudanças na sintonia de PIDs, nas estratégias de controle multimalhas e na manutenção de atuadores e medidores [2]. Dessa forma, o processo torna-se apto ao comissionamento do Sistema Especialista.

Além disso, a otimização do controle regulatório deve vir acompanhada de uma modelagem do processo. A partir dessa análise, o engenheiro é capaz de levantar a relação das variáveis contempladas no escopo do Sistema Especialista, bem como planejar as ações para evolução do controle.

No contexto de controle avançado de processos industriais, o Sistema Especialista recebe continuamente informações sobre a planta através dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP) ou Sistemas de Controle Distribuídos (DCS). Usam técnicas avançadas, como a lógica *fuzzy*, para calcular e enviar automaticamente novos *setpoints* que são obtidos pelo consenso de conhecimento modelado. Esse Sistema contém um conjunto de regras que reproduzem as melhores Práticas operacionais definidas como relação causa-consequência, modelados através de regras "*if...then*" [1]. A lógica *fuzzy* permite ainda qualificar variáveis de processo atribuindo a elas conceitos qualitativos tais como "alto", "estável" ou "baixo".

O método de implementação, comissionamento e manutenção tradicional desses Sistemas costuma exigir muito tempo e esforço e por isso, pensa-se em coleta de resultados a longo prazo. A aplicação IHM NEBULUZ entra nesse contexto com o

objetivo de superar tais restrições. Trata-se de um Sistema Especialista desenvolvido através de uma nova abordagem: metodologia ágil com entrega de valor de maneira rápida e sistemática e modelagem do conhecimento de uma equipe de especialistas multidisciplinar dada por meio de um fluxo sistêmico do processo em linguagem aberta e universal.

O presente artigo visa a detalhar a implementação do IHM NEBULUZ numa linha de britagem de minério de ferro. Inicialmente, será apresentado um breve resumo sobre o funcionamento do processo. Em seguida, serão apresentados os problemas identificados nesse processo e sua posterior modelagem. A partir dessa etapa, serão apresentadas as melhorias no controle regulatório da britagem e a consequente definição de estratégias de controle avançado. Por fim, apresenta-se a configuração e implantação do Sistema Especialista, assim como os resultados obtidos pelo controle.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição do Processo de Britagem

Em termos gerais, a linha de britagem é composta basicamente por duas etapas: cominuição e separação. Inicialmente, o ROM (*Runof Mine*), proveniente de duas minas distintas, alimenta britadores primários de mandíbula que promovem a redução granulométrica do material.

O minério é, então, transportado por correias que alimentam dois silos, denominados na figura 1 como SL-01 e SL-02. Alimentadores do tipo esteira (AL-01 e AL-02) localizados na base desses equipamentos, controlam a saída de minério que é direcionada para a correia TC-03.

Um transportador reversível controla a distribuição do material nos quatro silos de peneiramento: SL03-3, SL03-4, SL-03-5 e SL03-6. Cada um desses silos está associado a uma peneira vibratória (PE-01, PE-02, PE-03, PE-04) por meio de alimentadores de esteira.

O minério com granulometria adequada passa pelo peneiramento e alimenta a correia transportadora de produto, denominada TC-09. O material que não foi adequadamente britado, contudo, constitui a chamada carga circulante e é transportado para o silo SL-04 por meio da TC-05 e TC-06.

Dois britadores secundários (BR-03 e BR-04) promovem a rebitagem dessa carga, que é recirculada no processo por meio das correias TC-07 e TC-08.

A figura 1 ilustra de maneira simplificada o processo que é objeto do presente estudo.

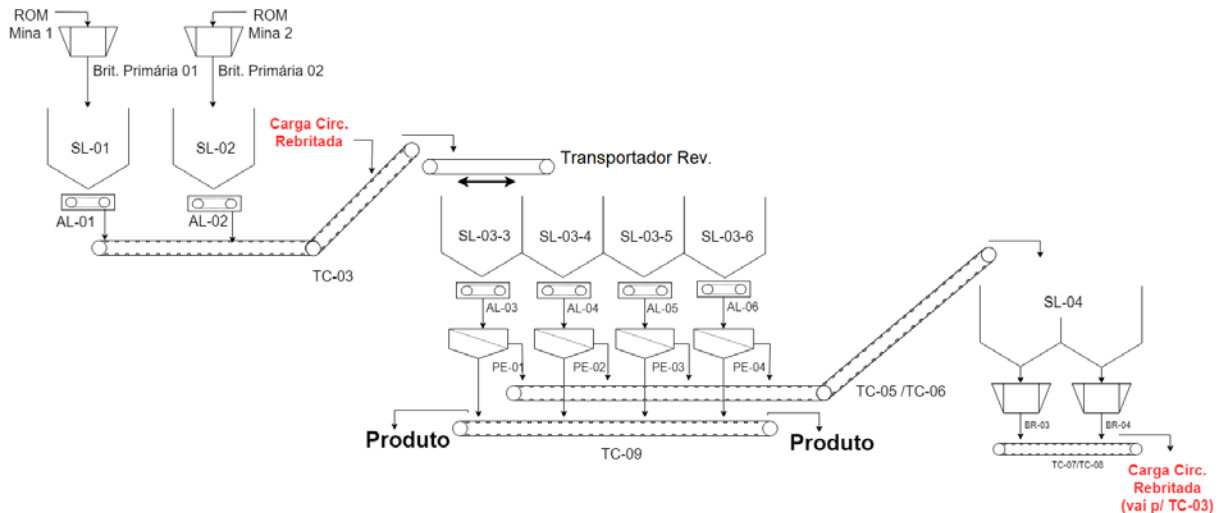


Figura 1. Fluxograma simplificado da linha de britagem. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

2.2 Identificação de Problemas no Processo

Inicialmente, foi possível identificar oportunidades de melhoria referentes ao controle regulatório do processo. O *setpoint* para a taxa mássica de produto atuava diretamente na velocidade dos alimentadores das peneiras. Nesse contexto, era possível observar uma variabilidade elevada na medição de taxa da TC-09 para um mesmo *setpoint* solicitado pela operação. Esse cenário sinalizava uma falha na sintonia do controlador.

Além disso, a estratégia de controle para a taxa da TC-09 não considerava restrições inerentes ao processo, como a capacidade da TC-05 e o nível máximo do SL-04. Por isso, eram identificadas paradas frequentes na linha de britagem por conta de intertravamentos do processo.

Após uma análise mais profunda do processo, foi possível identificar que a eficiência do peneiramento, ou seja, sua capacidade de separar o material, era diretamente influenciada pelas características do minério alimentado. Fatores como a umidade do ROM, granulometria do produto de britagem primária e a presença elevada de argilo-minerais poderiam reduzir a área superficial das peneiras vibratórias por “cegar” as telas das peneiras e prejudicar o processo de separação.

2.3 Modelagem do Processo

Com base no conhecimento do processo e das suas possíveis limitações, foi iniciada a etapa de modelagem, por meio do Pensamento Sistêmico. Essa metodologia permite, de forma abrangente, avaliar a relação de causa e efeito das diferentes condições e variáveis de processo por meio de modelos mentais [3]. A partir disso, é possível verbalizar os processos dinâmicos invisíveis que definem e perpetuam as estruturas de fluxos e, dessa forma, atuar no processo de maneira mais assertiva.

Em geral, os modelos mentais podem ser ilustrados por diagramas sistêmicos. Nessa representação, como mostra a figura 2, a influência é indicada por meio de dois tipos de setas: azuis e vermelhas. O primeiro tipo apresenta uma influência direta, ou seja, o aumento de uma variável causal provoca o aumento da segunda variável de efeito – e vice-versa. As setas vermelhas, por outro lado, indicam uma

influência inversa, isto é, o aumento de uma variável causal provoca a redução da variável de efeito – e vice-versa.

Quando ocorre uma relação circular de causaefeito, os diagramas apresentam enlaces, que podem ser reforçadores (indicado por R) ou balanceadores (indicado por B). Os enlaces reforçadores, como o nome sugere, reforçam o comportamento inicial das variáveis e podem gerar desequilíbrios no processo. Já os enlaces balanceadores promovem a estabilidade do processo [3].

A figura 2 apresenta o diagrama sistêmico do processo, destacando-se os elos balanceadores e reforçadores do modelo mental.

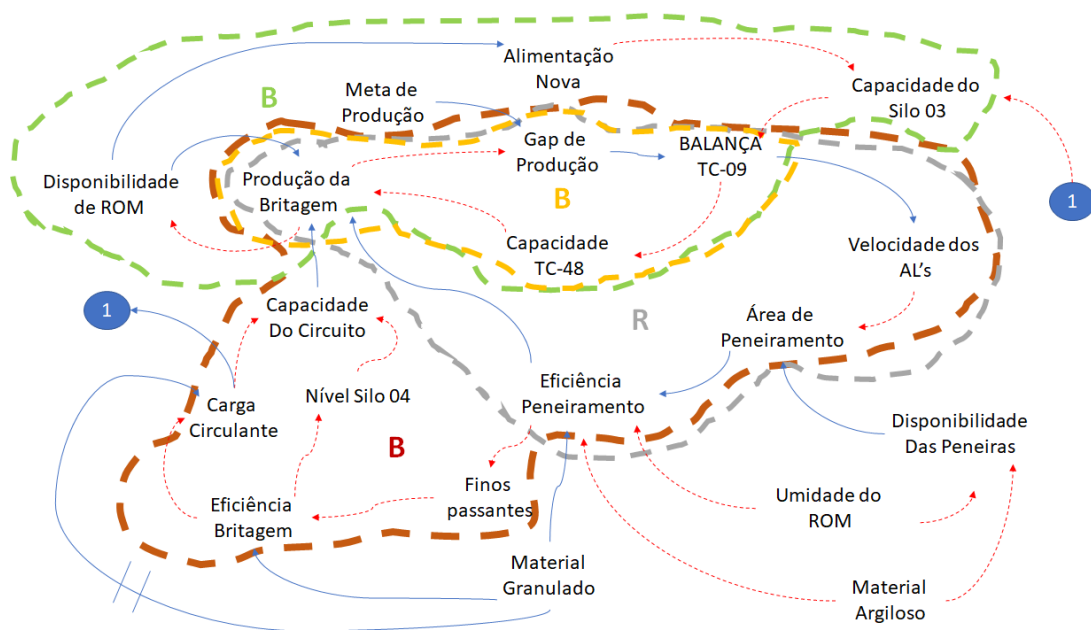


Figura 2. Diagrama sistêmico da linha de britagem. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

2.4 Melhorias do Controle Regulatório

Para associar o *setpoint* da TC-09 com a capacidade TC-05 e o nível do SL-04, foi proposta a implantação de uma estratégia de controle do tipo *override* ou controle seletivo. Nessa estratégia, largamente utilizada para proteção de equipamentos, uma restrição é imposta por outra variável de processo que também é diretamente afetada pela ação de controle [4].

No caso do processo em estudo, foram incluídas duas novas malhas de controle: a de nível do SL-04 (LIC-SL-04) e a da corrente da TC-05 (IIC-TC-05). Ambos os controladores atuam na velocidade dos alimentadores das peneiras, assim como a malha para a taxa da TC-09 (WIC-TC-09). Para as duas novas malhas, foram definidos *setpoints* diretamente relacionados à capacidade da correia (no caso de IIC-TC-05) e do silo (no caso de LIC-SL-04).

A velocidade dos alimentadores é determinada pelo menor valor de saída entre os três controladores, como ilustra a figura 3.

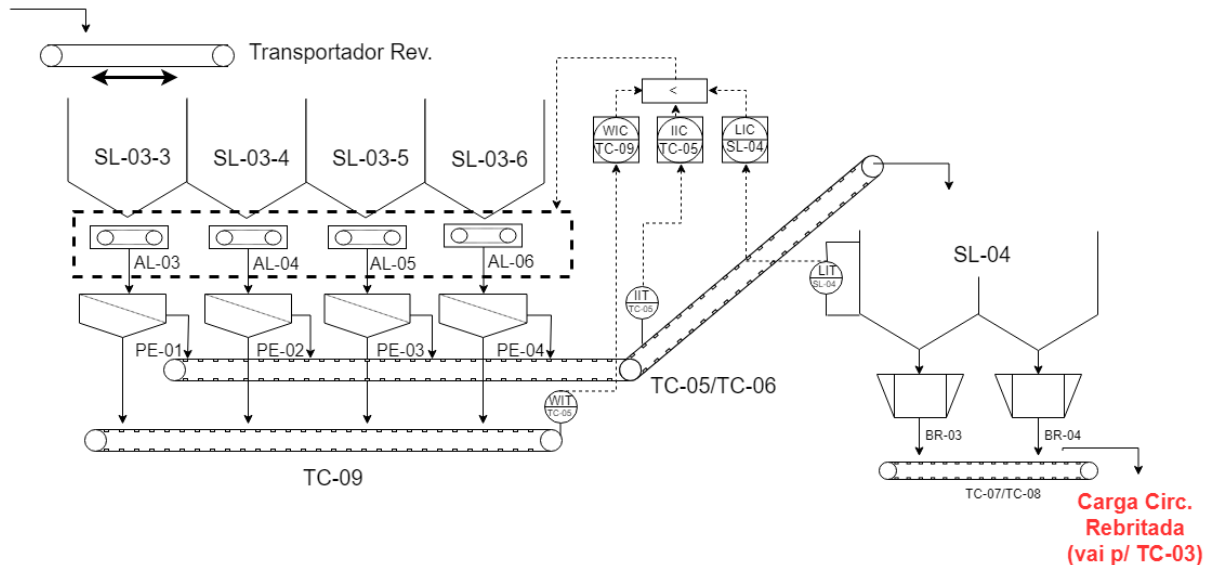


Figura 3. Estratégia *override* para controle da taxa mássica na TC-09. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

Uma vez definida a estratégia de controle, foi realizada a sintonia de cada um dos controladores do tipo PI. Para modelar as três malhas, foram realizados testes em degrau para a velocidade dos alimentadores e avaliado o seu efeito nas variáveis de processo (taxa mássica da TC-09, corrente da TC-05 e nível do SL-04). A função de transferência para os controladores foi de primeira ordem com atraso de tempo.

A partir das funções de transferência, os controladores do tipo PI foram sintonizados utilizando-se o método de síntese direta[5].

2.5 Definição de estratégias de controle avançado

Uma vez implementadas as novas estratégias de controle regulatório, foi definido o escopo do controle avançado a ser comissionado na linha de britagem. Em termos gerais, o objetivo do controle era a manipulação automática *desetpoint* da taxa mássica na TC-09, obedecendo às restrições de processo levantadas no modelo mental.

Diante do prazo estipulado para entrega do Sistema Especialista, que equivalia a aproximadamente 1 mês de atividades, foi necessário restringir a atuação do controle com base no diagrama sistêmico desenvolvido. Para isso, empregou-se uma metodologia ágil, baseada no conceito de gestão Scrum [6] e voltada para a entrega rápida de resultados ao processo industrial.

As variáveis de processo foram relacionadas conforme as regras de negócio e agrupadas duas a duas por matrizes *fuzzy*. Os resultados foram determinados na lógica nebulosa e atribuídos a novas variáveis de processo, obtidas pela abstração dos conceitos de rendimento operacional e eficiência dos equipamentos:

- Tendência de Erro da TC-09: associada à diferença entre o *setpoint* da taxa mássica na TC-09 e a medição da variável de processo (determinado pela relação entre o valor do erro na malha e variação do mesmo erro ao longo do tempo)

- Distribuição de Massa: refere-se à diferença entre a quantidade de material entregue como produto e a carga circulante no processo (determinada pela relação entre a variação da taxa medida na TC-09 e a variação da corrente na TC-05)
- Eficiência de Britagem Secundária (BR-03 e BR-04): associada à capacidade dos britadores em cominuir o material alimentado (determinada pela corrente e variação da corrente desses britadores)
- Tendência de Nível do SL-04: refere-se à quantidade de material retida no silo de carga circulante (determinada pela relação entre a corrente medida na TC-05 e a variação de nível do SL-04)

A partir das quatro variáveis obtidas, foram calculadas duas novas variáveis de processo: eficiência de peneiramento e carga circulante. Para isso, foi feita uma soma ponderada pela relevância da variável em questão nos incrementos de *setpoint* da TC-09.

Por fim, os incrementos de *setpoint* (tanto positivos quanto negativos) na taxa mássica da TC-09 foram obtidos pelo agrupamento, no domínio *fuzzy*, das duas variáveis obtidas na etapa anterior (eficiência de peneiramento e carga circulante).

Toda a etapa de definição da estratégia de controle é representada na figura 4.

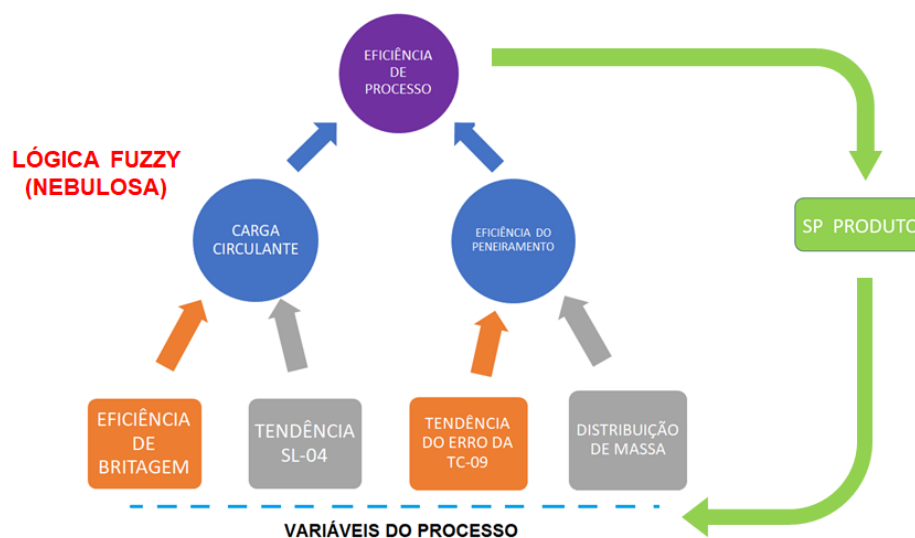


Figura 4. Definição da estratégia de controle avançado para a linha de britagem. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

2.6 Configuração e Implantação do Sistema Especialista

O Sistema Especialista, denominado IHM NEBULUZ, foi desenvolvido em linguagem Python e executado dentro do KNIME Analytics Platform. O KNIME é a principal solução para inovação baseada em dados, projetada para descobrir o potencial escondido em dados, mineração para novos *insights* ou previsão, sendo uma plataforma de código aberto[7].

Na interface gráfica com o usuário, o KNIME permite visualmente criar o fluxo de dados pela execução funções encapsuladas em blocos (ou “nós”). Essa estrutura

modular garante modelagens complexas com o uso mínimo de programação. Além disso, a plataforma possui “nós” que executam fragmentos de código em linguagem Python, como no caso deste projeto.

O fluxo do Sistema Especialista no KNIME consistiu basicamente no seguinte conjunto de etapas:

- Leitura e inserção de dados no banco SQL do Sistema;
- Análise, tratamento e cálculos estatísticos a partir dos dados lidos;
- Execução do Sistema Especialista, em linguagem Python, com as regras de controle avançado.

A interface entre o fluxo do KNIME e a operação foi feita no sistema de Supervisão e Controle (SCADA) existente e a interface de acompanhamento do controle é realizada no PIMS. A figura 5 apresenta uma das telas desenvolvidas no PIMS para acompanhamento do controle.



Figura 5. Interface desenvolvida no sistema PIMS para o IHM NEBULUZ. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

A coleta e inserção de dados no PLC, por outro lado, foi realizada por meio do protocolo OPC [8]. A figura 6 ilustra de forma sucinta a arquitetura para implantação do Sistema Especialista na linha de britagem.

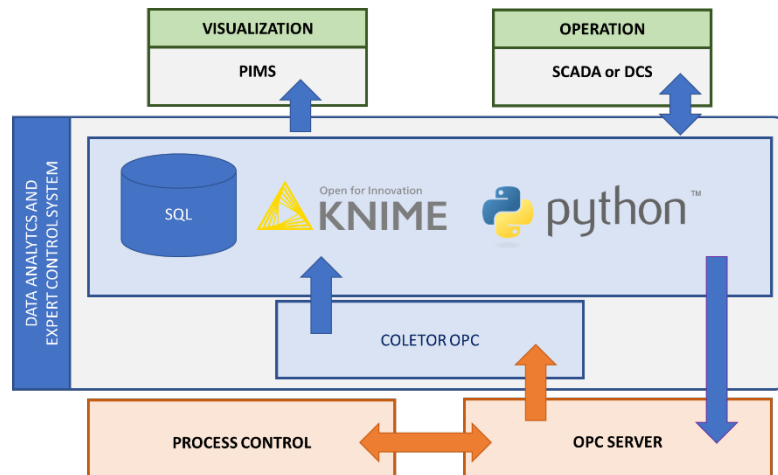


Figura 6. Arquitetura de implantação do IHM NEBULUZ. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

2.7 Resultados e Discussão

Com o objetivo de se avaliar a situação da britagem secundária antes da realização dos trabalhos de otimização, englobando tanto as atividades do controle regulatório quanto o percentual de funcionamento do Sistema Especialista IHM NEBULUZ, realizou-se uma caracterização estatística por média do processo de produção da britagem de modo a criar seu *baseline* preliminar de comparação. Para tal construção, foram coletados dados no período de 1 de março a 17 de junho 2018, com amostragem média a cada 1 hora (ou 24 horas para algumas variáveis), desconsiderando *outliers*. Entretanto, como a base de dados é até o dia 17 de junho de 2018, considerou-se na análise apenas os dados da primeira quinzena de cada mês.

Neste *case* o *baseline* estatístico é dado pela média aritmética da primeira quinzena dos meses de março e abril de 2018 de cada um dos indicadores de negócio relativos à produção e eficiência da britagem. Os indicadores avaliados são:

- Média de produtividade da TC-09 (t/h);
- Média de produtividade da Britagem (t/h) obtida através da Equação 1:

$$Produtividade = \frac{Produção (t)}{Utilização Física (h)} \quad (1)$$

- Média da disponibilidade física (DF) da britagem (%).

A figura 7 mostra o percentual de funcionamento do Sistema Especialista e a taxa horária de produtividade da TC-09, através da qual é medida a produção da britagem secundária, além de ser a principal variável envolvida nas atividades de otimização. Percebe-se um aumento médio expressivo na taxa da TC-09 se comparado com seu *baseline*.

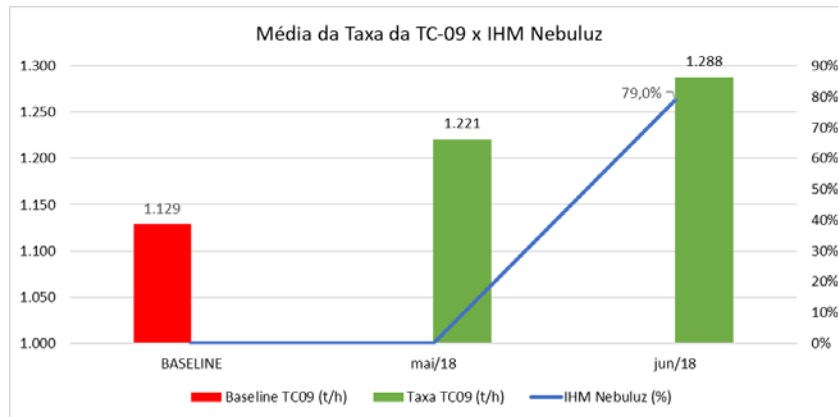


Figura 7. Taxa horária de produto na TC-09 e percentual de funcionamento do IHM NEBULUZ. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

Também foi observado melhoras no indicador de produtividade da britagem, conforme mostra a figura 8. O Sistema Especialista passou a operar efetivamente no mês de junho, onde obteve-se um alto percentual de funcionamento em sua primeira quinzena. O fato de a média da taxa da britagem estar abaixo da média da taxa do mês de maio (apesar de estar 333 t/h acima do seu *baseline*), pode ser explicada através do percentual da disponibilidade física da britagem, que atingiu 95% no mesmo período. 3% abaixo em relação a maio e 2% abaixo de seu *baseline*, como pode ser visto pela figura 8.

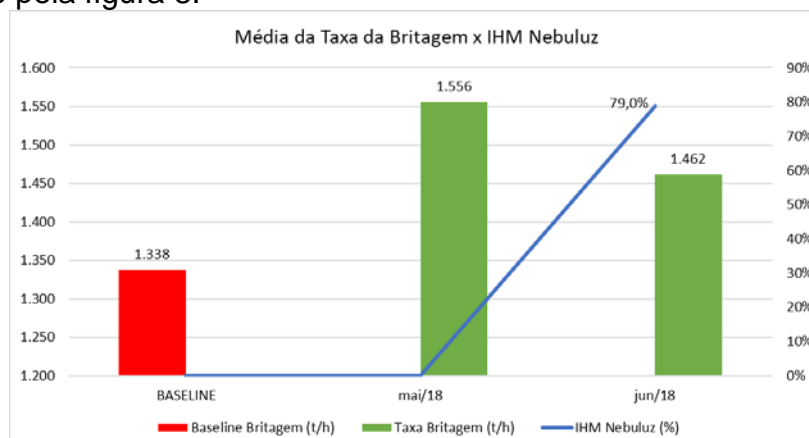


Figura 8. Produtividade na linha de britagem e percentual de funcionamento do IHM NEBULUZ. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

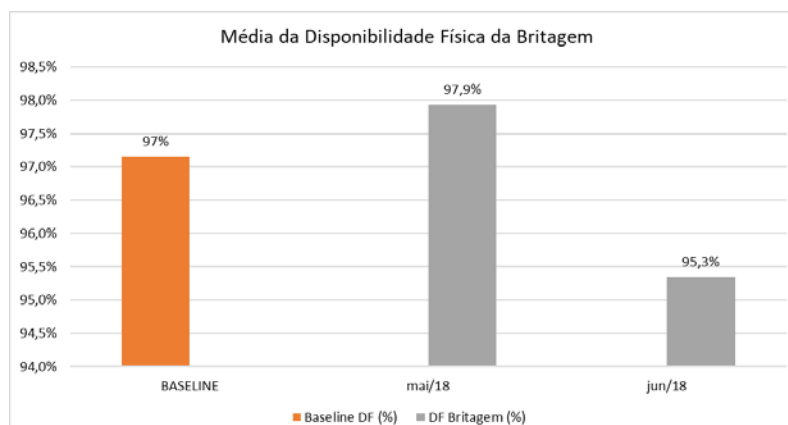


Figura 9. Disponibilidade física da linha de britagem. Fonte: IHM Stefanini, 2018.

A análise final dos resultados de desempenho ocorrerá em julho, onde os dados referentes a segunda quinzena de junho serão integrados a base de dados possibilitando a análise dos meses cheios. Com base nos resultados preliminares, estima-se uma captura de ganho de produção na ordem de grandeza em centenas de toneladas no ano.

3 CONCLUSÃO

Este artigo apresenta os resultados preliminares da britagem de minério de ferro numa mineradora brasileira provenientes de trabalhos de otimização utilizando um *framework* ágil, que acopla o controle regulatório ao Sistema Especialista IHM NEBULUZ da britagem secundária. Se torna evidente que é possível a entrega de resultados de valor a curto prazo unindo soluções co-criadas e metodologia ágil em qualquer segmento industrial, entregando resultados de forma gradativa e incremental, ao invés da tradicional metodologia de projeto com escopo fechado e prazo determinado. Para manter a sustentabilidade dos resultados capturados e a evolução dos algoritmos de controle se faz necessário a manutenção de um time de controle de processo para evitar que estes se percam ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- 1 Rehbein D, Thorp S, Deitz D, Schultz L. Expert systems in process control. ISA Transactions. 1992; 31(2): 49-55.
- 2 Oliveira E, Vieira J, Zilmar R, Gago R, Thimotio F, Grossi R. Shifting the Mindset on Process Optimization for Better Results. Automining 2018: Anais do 6th International Congress on Automation in Mining; 2018; Santiago, Chile. (Ch4) p.1-8.
- 3 Francisco AC. Proposição de um Processo Sistêmico e Sustentável para Gestão de Mudanças [dissertação]. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos; 2014.
- 4 Tsai Y, Cheng Y, Yu C. Design and Analysis of Override Control Systems. IFAC Proceeding Volumes. Junho de 2001. 34(25): 579-584.
- 5 Chen D, Seborg DE. PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection. Ind. Eng. Chem. Res. 2002; 41(19): 4807-4822.
- 6 Schwaber K, Sutherland J. The Scrum Guide™[material instrucional]. Denver (Estados Unidos): SCRUM ALLIANCE; novembro de 2017.
- 7 KNIME Analytics Platform [Internet]. Zurique (Suíça): KNIME. [acesso em 15 de junho de 2018]. Disponível em: <https://www.knime.com/knime-analytics-platform>.
- 8 Barroso DS, Quintino JA, Gomes FJ. Protocolo OPC somado a sistemas de controles industriais desenvolvidos com java e SCILAB. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics (vol. 1, n. 1). São Carlos: SBMAC; 2013.