

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONTROLE DE VELOCIDADE DA MÁQUINA DE SINTER SOB NOVAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS\*

Arnaldo Veronêz Júnior<sup>1</sup>  
Gabriel Duarte de Andrade<sup>2</sup>

## Resumo

Em um processo de sinterização, a velocidade da máquina de sinter deve ser controlada, com o intuito de garantir que o ponto final de queima da camada a sinterizar esteja dentro de uma faixa que possibilitará elevada produtividade. Este artigo apresenta um modelo físico que descreve o movimento da frente de queima da camada ao longo do leito e o controle de velocidade implantado no sistema de automação de nível 2 da Sinterização da ArcelorMittal Tubarão. O controle de velocidade foi proposto para manter o ponto final de queima em torno do valor do *setpoint* escolhido. Ao longo dos anos, as condições operacionais da planta de sinterização mudaram em razão da variação da qualidade dos minérios que compõem a mistura. Nesse contexto, o controle foi avaliado e apresentou resultados satisfatórios, permitindo à operação uma forma de controlar o processo sem adicionar atrasos relacionados à tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Sinterização; Controle de velocidade da máquina de sinter; BTP.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF SINTER MACHINE SPEED CONTROL UNDER NEW OPERATIONAL CONDITIONS

### Abstract

In the sinter process, the sinter machine speed should be controlled in order to keep burn-through point in a range that aims a high productivity level. This article presents a physical model describing the movement of the burning zone and the control model implemented in level 2 automation system from ArcelorMittal Tubarão. The sinter machine speed control was proposed to keep the position of the burn-through point near to defined setpoint. Over the years, operational conditions have changed due to ore quality deviation from raw mix. In this context, the control model was evaluated and has shown good results, allowing operation controls sinter process without delaying the decision-making process.

**Keywords:** Sinter plant; Sinter machine speed control; BTP.

<sup>1</sup> Pós-Graduado em Engenharia de Produção, Especialista de Automação, Gerência de Área de Engenharia de Automação, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Eletricista, Especialista de Automação, Gerência de Área de Engenharia de Automação, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Em uma planta de sinterização, a velocidade da máquina de sínter deve ser controlada, a fim de assegurar que todo o processo de sinterização das matérias-primas termine até determinada posição horizontal da máquina. Tal posição é previamente alocada dentro de uma faixa que possibilite o resfriamento adequado do sínter produto e garanta maior produtividade. A posição em que o processo de sinterização se finda é chamada de *Burn-Through Point* (BTP) ou ponto final de queima. Neste ponto, a temperatura dos gases de exaustão atinge o maior patamar.

O processo de sinterização é representado matematicamente por um modelo físico que descreve o movimento da frente de queima através do leito da máquina de sínter [1]. A Figura 1 mostra a distribuição espacial da temperatura dos gases de exaustão ao longo da máquina de sínter.

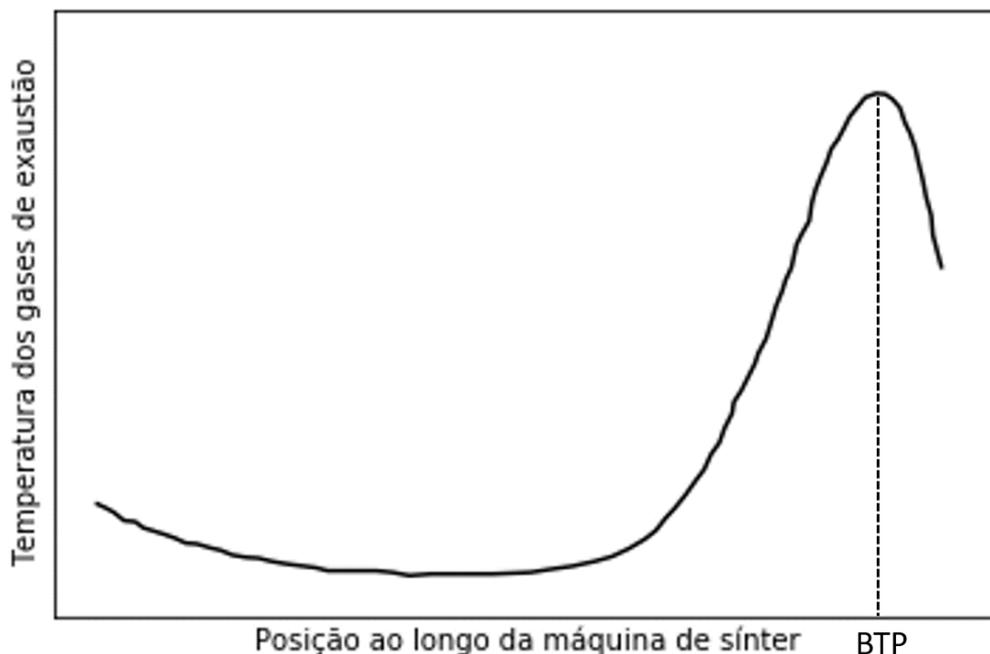


Figura 1 – a) Distribuição espacial da temperatura dos gases de exaustão. Extraído de [2]

O processo de um material em sinterização compreende quatro etapas: ignição, desidratação, sinterização e resfriamento. A etapa de ignição tem início sob a área do forno, Figura 2, sendo ela responsável por iniciar a queima da mistura de finos de minério de ferro, fundentes, finos de coque, finos de retorno e água. Em geral, utiliza-se a cal como aglomerante dessa mistura, em um processo físico anterior à ignição. Os materiais são dosados e misturados na presença do aglomerante com a adição de água.

A combustão dos finos de coque provê o calor necessário para a continuidade do processo. O aumento do gradiente de temperatura devido à queima do combustível da mistura resulta na etapa de desidratação.

A composição da mistura, o tamanho do leito da máquina de sínter e a pressão de sucção ao longo do processo determinam o tempo necessário para a sinterização do material [1]. O resfriamento é a etapa que ocorre logo após todo material ter sido submetido ao processo de sinterização. O sínter produto é, então, britado e peneirado antes de ser estocado.

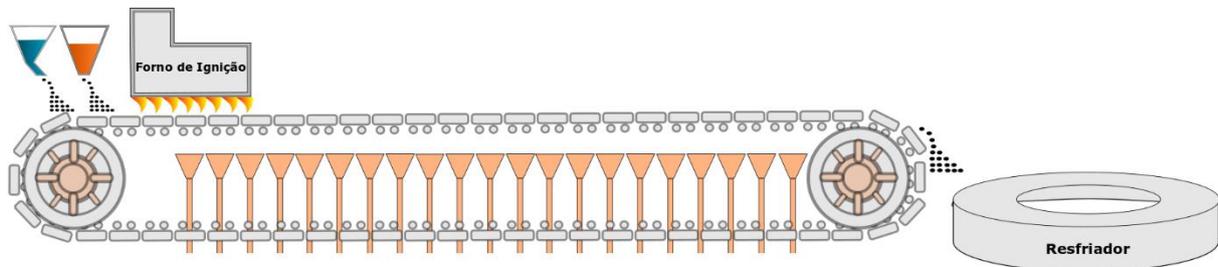


Figura 2 – Esquemático da planta de Sinterização da ArcelorMittal Tubarão.

Durante o percurso da mistura de materiais do início da área sob o forno de ignição até o final da máquina, o ar é succionado através do leito, movimentando a frente de queima da superfície até o fundo do leito [3]. A velocidade vertical da frente de queima e a velocidade horizontal da máquina de sínter determinam a posição exata do BTP. Dessa forma, controlando a velocidade horizontal da máquina é possível manter o ponto final de queima dentro da faixa desejada.

A ArcelorMittal Tubarão (AMT) possui implantado em seu sistema de automação de nível 2 da planta de Sinterização, um modelo de controle de velocidade da máquina de sínter que será apresentado neste artigo. O controle proposto por [1] foi igualmente comissionado em plantas da Coréia do Sul e da Áustria.

Os objetivos do artigo são: apresentar o modelo físico que descreve o movimento da frente de queima; descrever como é realizado o controle de velocidade da máquina de sínter e apresentar resultados relativos ao desempenho do modelo frente às mudanças de condição operacional ao longo dos anos na AMT.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O modelo apresentado nesta seção encontra-se implementado no computador de processo da planta de sinterização da ArcelorMittal Tubarão.

### 2.1 Modelo físico da frente de queima

O movimento da frente de queima no leito da máquina de sínter é, segundo [1], formulado matematicamente como um problema de valor inicial. A aceleração do movimento é aumentada pela pressão de sucção e, concomitantemente, reduzida pela mistura de materiais contidas no leito.

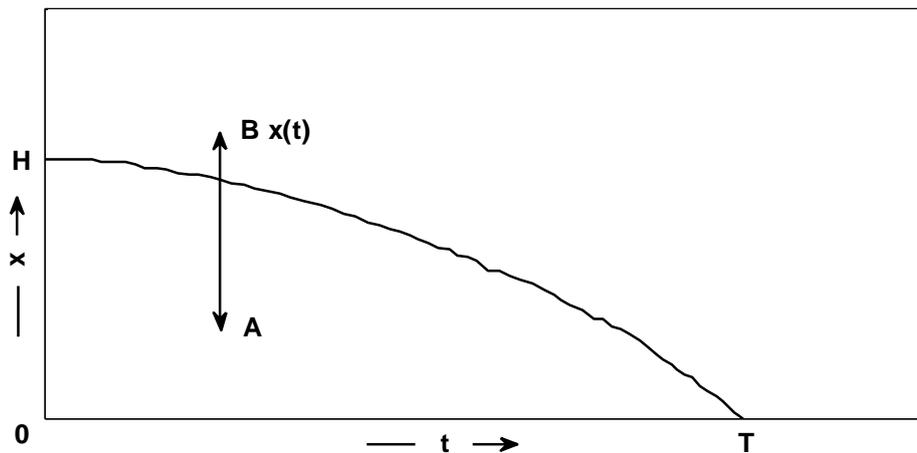


Figura 3 – Frente de queima em função do tempo.

A Figura 3 mostra a força exercida pela pressão de sucção no leito e a resistência criada pela mistura, os dois fatores que mais influenciam o movimento da frente de queima. Pode-se equacionar o fenômeno físico a partir das seguintes equações:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -A + Bx(t) & (1) \\ x(0) = H & (2) \\ \frac{dx(0)}{dt} = 0 & (3) \end{cases}$$

Onde:

- $t$  é o tempo ( $t = 0$  é o tempo inicial);
- $x(t)$  é a posição da frente de queima;
- $A$  é a pressão de sucção;
- $B$  é a resistência interna da mistura de materiais, e
- $H$  é o tamanho do leito ou altura da camada.

A pressão  $A$  pode ser representada pela vazão dos gases de exaustão sob a área da frente de queima [1]. Esse fato é uma vantagem que facilita a medição dessa variável de processo. Outra consideração importante é que a resistência  $B$  pode ser expressa em função da permeabilidade do material carregado.

Todos esses parâmetros são medidos ao longo do processo ou são calculados com base em alguma medição realizada.

### 2.1.1 Solução da equação

Assumindo que  $A$  e  $B$  são variáveis independentes no tempo, a solução do conjunto de equações diferenciais (1-3) é dada por:

$$x(t) = (H - A/B) \cosh(\sqrt{B} t) + A/B \quad (4)$$

O tempo  $T$  em que a frente de queima atinge o fim do leito é chamado de *Burn-Through Time* (BTT):

$$x(T) = 0 \quad (5)$$

A razão pela qual a pressão e a permeabilidade são consideradas independentes no tempo é o fato de que, sob condições normais de operação, esses valores variam pouco e muito lentamente.

O modelo apresentado para o movimento da frente de queima é uma abordagem simplificada do processo de sinterização pois não leva consideração os processos de transferência de calor, de combustão dos materiais envolvidos e nem da desidratação da mistura. Entretanto, os parâmetros das equações são mensuráveis e permitem uma adaptação do modelo à realidade de operação da planta [1].

Existe uma diferença entre os valores reais e os valores calculados pelo modelo para variáveis BTT e BTP. Os valores reais são determinados por um algoritmo que leva em consideração a medição das temperaturas das caixas vento e da velocidade horizontal da máquina.

## 2.2 Controle de velocidade da máquina de sínter

A Figura 4 ilustra o fluxograma do controle da velocidade da máquina de sínter. O módulo de controle envia para a máquina apenas o sinal de velocidade. Todas as outras variáveis de processo mostradas na imagem são utilizadas como parâmetros de entrada que abastecem a malha de controle e possuem seus respectivos módulos controle.

O módulo de controle funciona adequadamente mediante à disponibilização das seguintes variáveis coletadas pelo sistema de medição [1]:

- Altura da camada,  $mm$ ;
- Vazão dos gases de exaustão,  $m^3/min$ ;
- Permeabilidade do leito;
- Velocidade da máquina de sínter,  $m/min$ ;
- BTP,  $m$ .

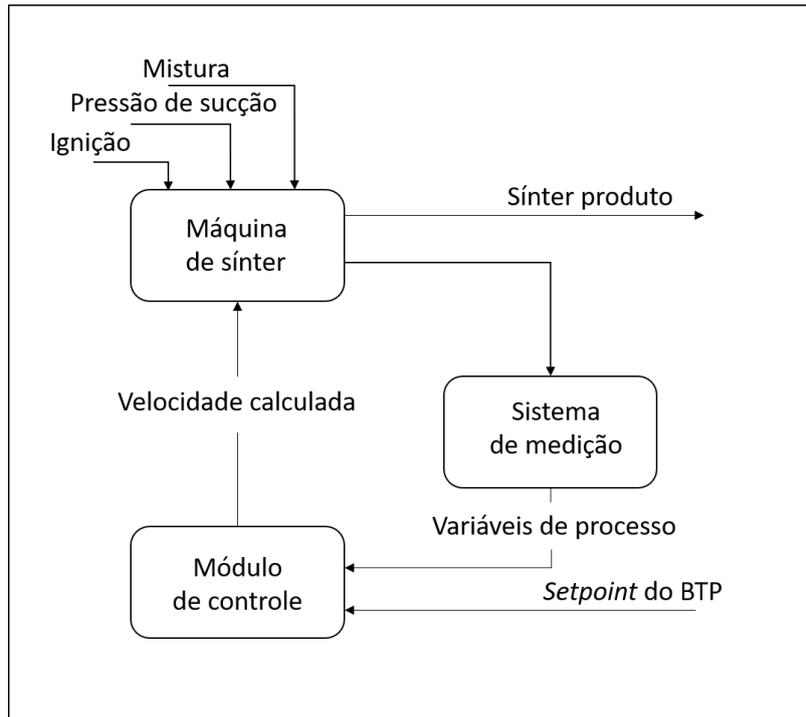


Figura 4 – Fluxograma do controle de velocidade da máquina.

A permeabilidade do leito é calculada em função da vazão dos gases de exaustão, da altura da camada, de parâmetros do forno de ignição e da diferença de pressão sob a zona de ignição e a primeira caixa de vento da máquina. Já o BTP real é obtido, conforme salientado na seção anterior, por um algoritmo que considera o perfil térmico das caixas de vento da máquina.

Os dados são coletados periodicamente e, então, é realizado o cálculo da velocidade da máquina de sínter que será apresentada na próxima seção.

### 2.2.1 Cálculo do BTT e da velocidade.

Antes do modelo do movimento da frente de queima ser aplicado pelo módulo de controle, é realizado o cálculo do BTT para o BTP obtido pela distribuição térmica das caixas de vento. Esse cálculo é realizado para ajustar os parâmetros relativos à evolução da vazão dos gases de exaustão e da permeabilidade do leito ao longo. O BTT é calculado pela integral definida da velocidade da máquina em condições normais de operação, onde  $T$  é o BTT.

$$\int_0^T v(t)dt = BTP \quad (6)$$

Por meio das equações (1), (2), (3), (4) e (5), é possível estimar o BTT para um material carregado passando sob a área de ignição e, finalmente, calcular o valor da velocidade da máquina que será usada como saída do módulo de controle. O cálculo da velocidade é função do valor de *setpoint* do BTP solicitado pela operação.

## 2.4 Mudança nas condições operacionais

Ao longo dos anos, as condições operacionais da planta de sinterização mudaram em razão da variação da qualidade dos minérios que compõem a mistura. A Figura 5 ilustra a mudança no percentual de sílica de um tipo de minério de ferro fino que integra a mistura. A qualidade do minério foi analisada desde 2014 até 2019. É perceptível que ao longo dos anos, houve uma variação acentuada nos terceiros quartis da distribuição das análises de minério de ferro. Embora a média se mantenha em um patamar estável no decorrer dos anos, o desvio-padrão do teor da sílica na composição do minério tem aumentado bastante, criando variabilidade na distribuição da qualidade.

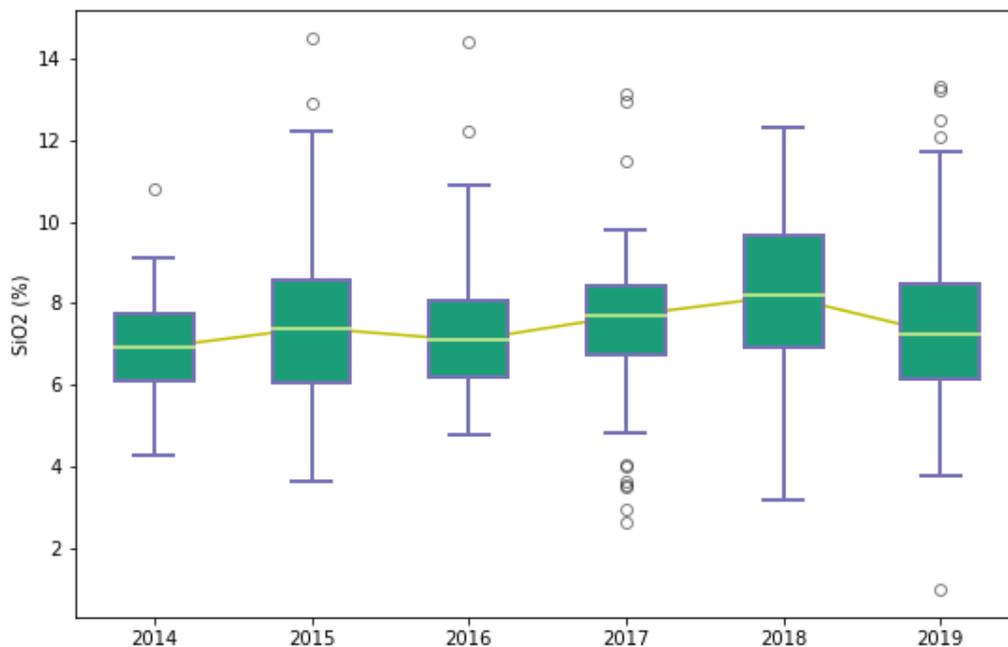


Figura 5 – Variação do SiO<sub>2</sub> em um minério que compõe a mistura.

Além da sílica, as mudanças de condições ocorrem também em outros indicadores, como o ferro total, o tamanho médio e a perda por combustão da mistura. A oscilação na composição química do leito de sinterização afeta diretamente o parâmetro de permeabilidade utilizado no controle de velocidade da máquina de sínter. A influência dessa variação foi analisada com o auxílio da operação da planta de Sinterização, quando a máquina ficou por dois dias operando automaticamente pelo sistema de automação de nível 2.

## 2.5 Resultados

A operação da sinterização dispõe da tela apresentada na Figura 6 para conduzir o processo utilizando o controle apresentado.

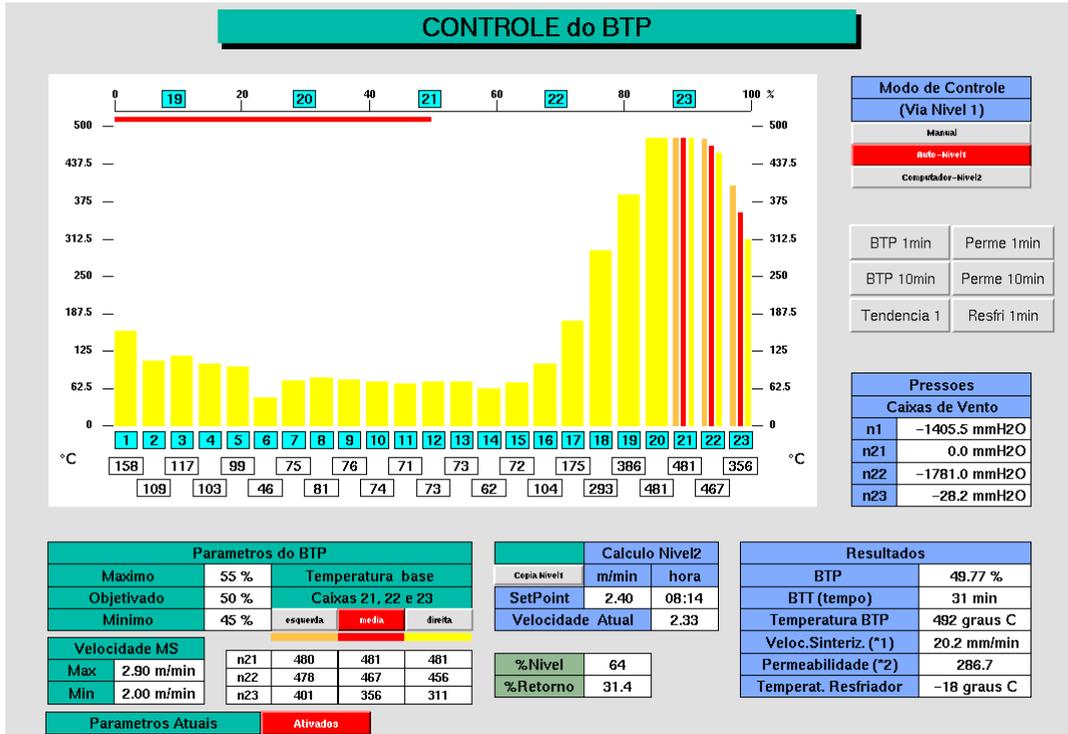


Figura 6 – Tela do sistema de nível 2.

Mesmo em condições operacionais com grande variabilidade na qualidade dos minérios, o controle se comportou de maneira satisfatória mantendo o BTP dentro da faixa desejada, por quase toda a operação. A posição do BTP é medida em percentual relativo ao comprimento da máquina de sínter e a faixa selecionada para a ocasião foi entre 45 e 55%, como mostra a Figura 7. Foi possível manter o BTP dentro da faixa, apesar da variabilidade apresentada na composição da mistura.

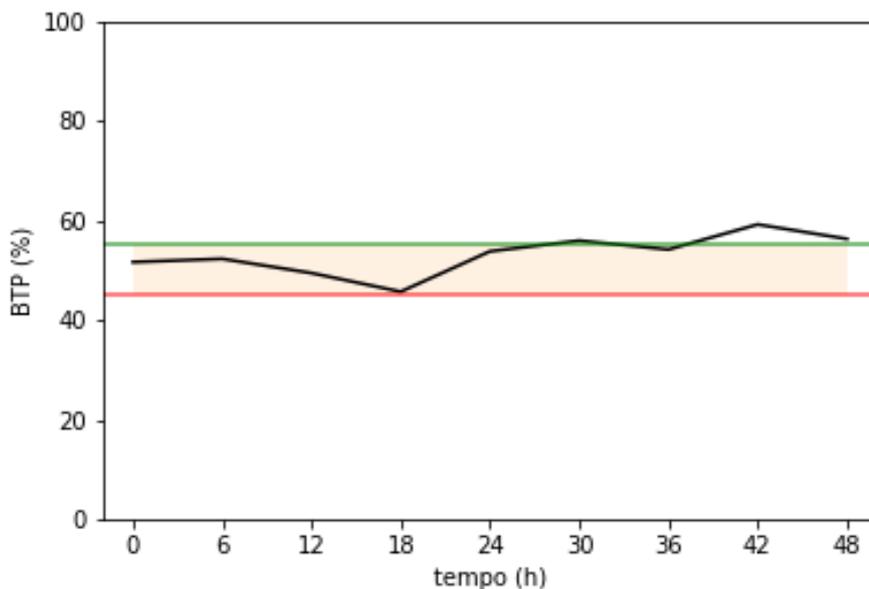


Figura 7 – Posição do BTP.

### 3 CONCLUSÃO

Conclui-se com este trabalho que o controle de velocidade da máquina de sinter comissionada na planta da ArcelorMittal Tubarão, embora considere uma abordagem simplificada do que ocorre no processo de sinterização, atende muito bem o requisito de manter o BTP numa faixa em que seja possível obter alta produtividade sem impactar no processo de resfriamento do sinter produto.

Além disso, o modelo se comporta muito bem mesmo com a mudança nas condições operacionais ao longo do tempo, isso porque a lógica do ajuste de parâmetros dentro da malha de controle permite o modelo se adequar a novas demandas impostas pela dinâmica do processo e pela mudança da qualidade das matérias-primas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem as contribuições feitas pela equipe de Automação da área de Redução da ArcelorMittal Tubarão.

### REFERÊNCIAS

- 1 STRAKA, G. Process control model for sinter machine speed. Metallurgical Plant and Technology International. 1992. 78-80.
- 2 Xiaohui Fan, Xuling Chen and Yi Wang (2010). Expert System for Sintering Process Control, Expert Systems, Petrica Vizureanu (Ed.), ISBN: 978-953-307-032-2, InTech.
- 3 TAKANO, C. Aglomeração. In: MOURÃO, M. B., et al. Introdução à Siderurgia. 1ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011. Cap. 2.7.4, p. 38 - 50.