

## GANHOS COM AIMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO EM FORNOS DE PELOTIZAÇÃO<sup>1</sup>

Marcos Vinícios da Silva Cavalcante<sup>2</sup>

Rodrigo Cesar de Miranda<sup>3</sup>

Bruna Torres Negreiros Cordeiro Andrade<sup>4</sup>

Sushanta Majumder<sup>5</sup>

Venkataramana Runkana<sup>6</sup>

### Resumo

A qualidade do minério de ferro em forma de pelotas, representada em termos de resistência à compressão a frio, e, ou índice de tamboramento, tem uma forte influência na produtividade e consumo energético dos alto-fornos além de reflexos no produto final da siderurgia. O controle avançado de processo de uma instalação de pelotização, baseado em simulação por modelos matemáticos é apresentado. A previsão da qualidade e regras derivadas da simulação são utilizadas para controlar o processo de queima, a qualidade do produto e otimizar o processo em termos de eficiência energética e produtividade. Os resultados da implementação em uma escala industrial dessa estratégia baseada em modelos é apresentada.

**Palavras-chave:** Pelotização; Controle avançado; Simulação.

### GAINS FROM THE IMPLEMENTATION OF ADVANCED PROCESS CONTROL TO PELLETIZING FURNACE

#### Abstract

The quality of iron ore pellets, represented in terms of parameters such as cold compressive strength (CCS) and Tumble Index (TI), has a strongly influence on the productivity and energy of reduction furnaces like the blast furnace and on the quality of hot metal or liquid iron. Advanced process control of an industrial iron ore pellet induration process simulated using mathematical models for pellet quality is described in this paper. The predictions of the quality along with the rules derived from simulation results are then utilized to control the induration process to achieve precise control of the quality parameters and to optimize the induration process in terms of fuel efficiency and productivity. Results of implementation of this model-based control strategy on an industrial scale induration process will be presented.

**Key words:** Pelletizing; Advanced process control; Simulation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 18 a 21 de setembro de 2012, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Eng. de Controle e Automação. Gerente da área de fornos. Samarco, Anchieta - ES

<sup>3</sup> Eng. Químico MSc, Processos. Gerente de Processos. CEMI, Belo Horizonte - Minas Gerais

<sup>4</sup> Química. Consultora Técnica. CEMI, Belo Horizonte - Minas Gerais

<sup>5</sup> Eng. Químico Cientista Consultor. Tata Consultancy Services Ltd., Pune, Índia

<sup>6</sup> Eng. Ambiental PhD. Diretor científico. Tata Consultancy Services Ltd., Pune, Índia

## 1 INTRODUÇÃO

A transformação do concentrado minério de ferro do tipo *pellet feed* em esferas endurecidas para alimentar um alto forno ou forno de redução direta de ferro é conhecida como pelletização. A resistência à compressão, além de características metalúrgicas apropriadas são qualidades atribuídas às pelotas através de um processamento térmico no forno de pelletização. Tendo em vista a necessidade de redução de custos operacionais e aumento da produção dos fornos de pelletização, projetos que utilizam controle avançado de processo (APC, do inglês *advanced process control*) têm por objetivo a melhoria do desempenho dos fornos de pelletização e apresentam uma relação custo-benefício vantajosa. Dentre os inúmeros tipos de APCs, o emprego de sistemas especialistas para processos não lineares é recomendado. Os resultados são o aumento da produção, redução em energia e redução no desvio padrão da qualidade.

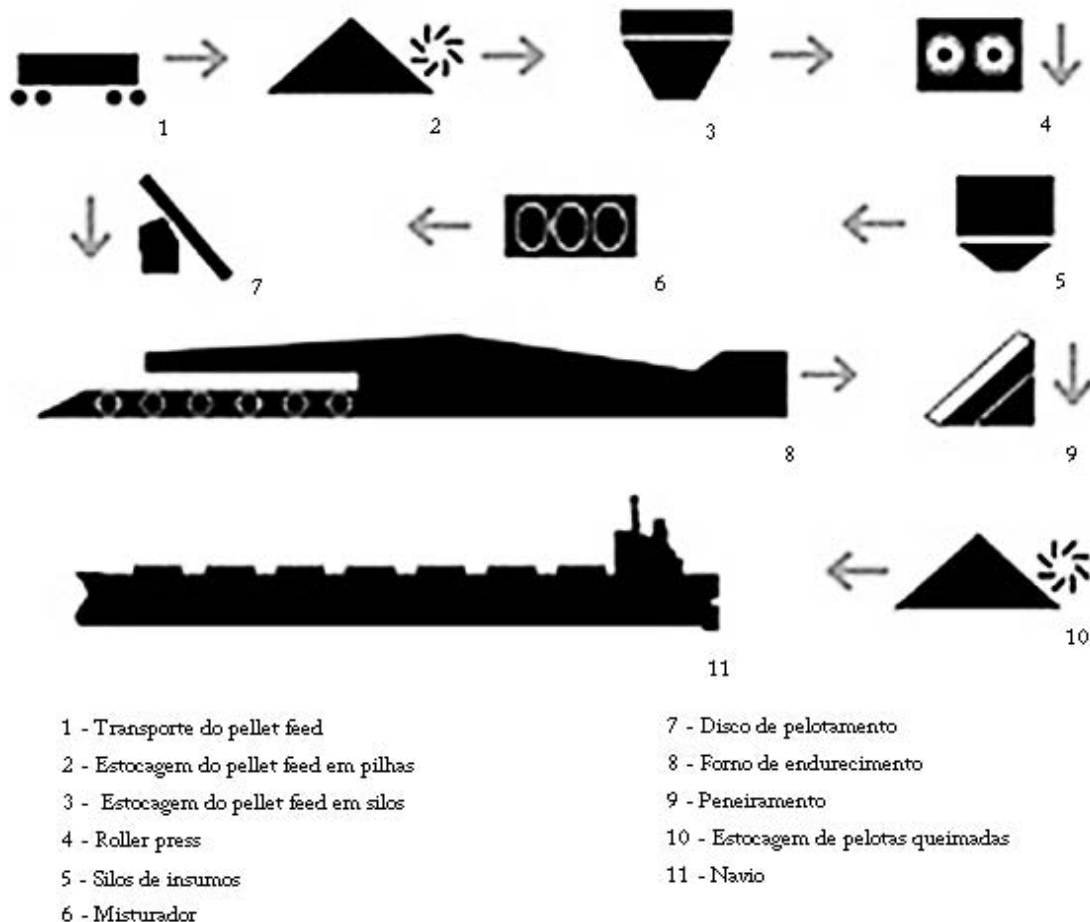
A simulação do forno de pelletização a partir de dados de processo é feito por modelos matemáticos implementados no aplicativo Virtual Indurator™. A transferência de calor, cinética química, balanço de massa e fluxo de gás através de meios porosos formam a base de princípios empregados no desenvolvimento desse simulador. O Virtual Indurator™ também age fornecendo informações que auxiliam na tomada de decisões e controle do processo, estimando valores que são de difícil acesso, como temperatura do leito de pelotas e dos gases.

A base do sistema de controle avançado OptProcess® é o sistema especialista, auxiliado por módulos de modelamento matemático, estatística, redes neurais e outros, que o torna apto a avaliar o processo como um todo e tomar decisões assertivas baseadas em variáveis lidas no processo.

A integração do sistema de controle avançado OptProcess® ao Virtual Indurator™ é apresentada no presente trabalho. O controle avançado de processos baseado em modelos de simulação propicia um aumento de produtividade, uma vez que informações de tendência e desempenho do processo são disponibilizadas mesmo antes dos resultados de laboratório. Dessa forma, o OptProcess® recebe informações do processo on-line, analisa e corrige esses dados para entrada no simulador e critica os resultados obtidos desta. Em decorrência tem-se a obtenção de dados de processo mais confiáveis e um melhor controle do processo.

## 2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS PELOTAS

A Figura 1 mostra o processo esquemático de produção das pelotas, desde o transporte do *pellet feed* até o carregamento das pelotas no navio. A descrição Detalhada do processo é referenciada à Meyer.<sup>(1)</sup>



**Figura 1** – Processo de produção de pelotas.

O material, minério, com pelo menos 85% passante em 45µm e teor de sílica em torno de 3% é chamado de *pellet feed*, matéria prima das pelotas.

O processo se inicia no Roller Press, onde o *pellet feed* é cominuído, adequando-se a superfície específica do material à etapa de pelotamento.

Os insumos de calcário, aglomerantes e carvão são preparados, dosados e homogeneizados ao *pellet feed*, formando uma mistura utilizada no pelotamento. A adição de calcário ajusta a qualidade química do material, os aglomerantes tem o papel de melhorar a formação da pelota crua e o carvão fornece energia térmica quando da etapa de queima.

A transformação da mistura de *pellet feed* e insumos em pelotas de formas esféricas adequada é conseguida nos discos de pelotamento. O produto dos discos é classificado quanto ao tamanho das pelotas, de forma a melhorar a permeabilidade do leito de pelotas cruas. O circuito é fechado com o retorno do material de tamanho inadequado aos discos de pelotamento.

As pelotas são então submetidas a um tratamento térmico no forno de endurecimento, onde adquirem resistência mecânica e física apropriada. O processo é chamado de endurecimento ou queima.

A Figura 2 apresenta de forma esquemática o forno de endurecimento, sendo que a numeração indica as caixas de vento do equipamento (cada caixa de vento possui 6m de extensão). Podemos dividir o forno em regiões com funções específicas, as quais podem ser citadas como secagem ascendente (1 a 3), secagem descendente (4 a 7), pré-queima (8 a 12), queima (13 a metade da 20), pós-queima (metade da

20 a 21), resfriamento primário (22 a 29) e resfriamento secundário (30 a 32). O fluxo gasoso nesse equipamento é complexo e visa o maior aproveitamento energético gerado pelos queimadores localizados nas regiões de pré-queima, queima e pós-queima. O processo inicia na secagem ascendente, que aproveita o gás utilizado no resfriamento secundário, promovendo a secagem das pelotas que entram com umidade de até 10%. Essa etapa também confere resistência suficiente para a secagem descendente, onde o ar entra com uma temperatura maior e remove a umidade remanescente. A etapa de pré-queima promove um aquecimento suave para não ocorrer o choque térmico que poderia ocorrer se as pelotas entrassem direto no processo de queima. Na etapa de queima é fornecida energia para ocorrer o processo de sinterização. As próximas etapas são necessárias para o resfriamento das pelotas.

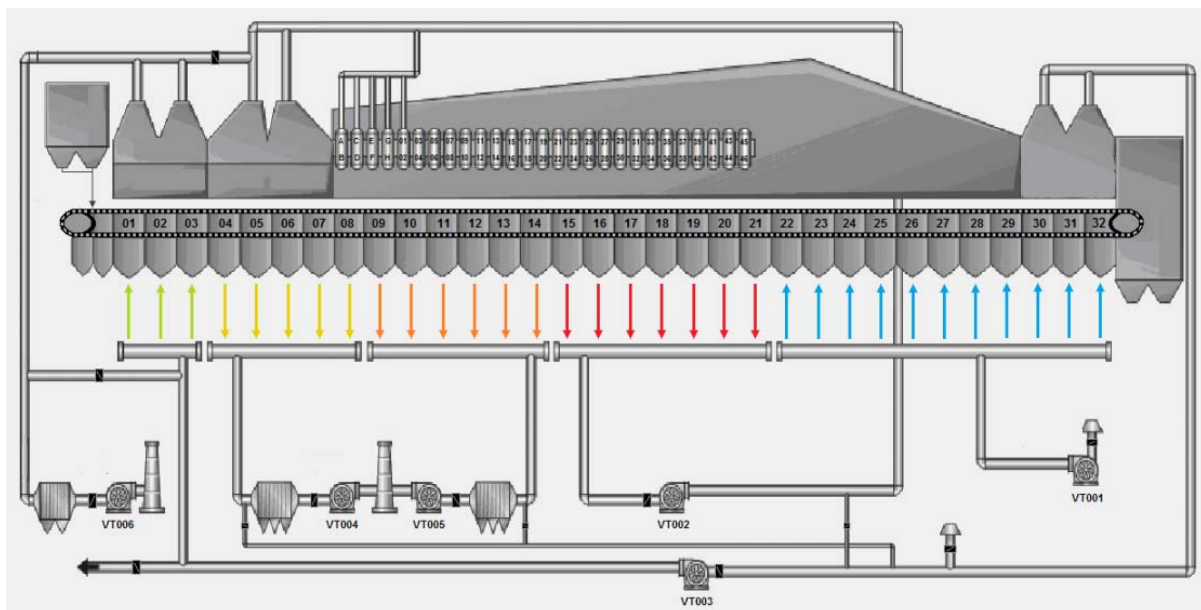


Figura 2 – Figura esquemática do forno de endurecimento.

Na sequência, as pelotas são novamente classificadas por tamanho através de um peneiramento, sendo o rejeito denominado *pellet screening*. As pelotas são então direcionadas para a pilha de material e posteriormente ao embarque.

### 3OPTPROCESS®

O fato das relações entre as diversas variáveis que determinam um processo serem não-lineares é a maior limitação das estratégias clássicas de controle na indústria mineral e metalúrgica. Além disso, a impossibilidade de se medir variáveis importantes tornam a tarefa mais problemática. A tecnologia de controle avançado de processo oferece numerosas alternativas para isso, principalmente a utilização de modelos físicos do processo. As variáveis não medidas no processo podem ser acessadas através de modelos matemáticos dinamicamente calibrados, que explicam ainda as variações do processo. Um eficiente sistema de controle avançado pode ser desenvolvido através desse conjunto de variáveis medidas e calculadas, aliando ainda técnicas avançadas de controle como a de sistemas especialistas.

O OptProcess® é um sistema universal para soluções em controle avançado de processos, que proporciona um controle robusto e equilibrado. Desenvolvido pela

CEMI para atender as necessidades das indústrias, visa aprimorar o desempenho do processo. O sistema foi construído em uma estrutura modular, como apresentado na Figura 3, e oferece uma forma efetiva e flexível de controlar diferentes sistemas e processos, incluindo problemas relacionados com a agregação e análise de informação e tomada de decisão.



Figura 3 – Estrutura modular do sistema.

Os módulos utilizados no presente trabalho são sucintamente descritos abaixo:

*Módulo Modelamento:* podem-se construir diferentes tipos de modelos físicos, e integrar todas as variáveis associadas a ele ao sistema, sendo que esta característica permite ao usuário utilizar dados de entrada e saída do modelo em qualquer módulo do sistema;

*Módulo Especialista:* parte principal do sistema, que recebe as informações de todos os módulos e através de regras baseadas no conhecimento do processo, toma decisões por inferência nebulosa ou crisp;

*Módulo Estatístico:* produz a análise estatística dos dados de processo e dos outros módulos, além da apresentação dessas informações graficamente, que possibilita a avaliação contínua do processo;

*Módulo HMI:* cria a interface homem-máquina, facilitando a visualização de dados, o fluxograma do processo e entrada de dados ou escolhas de opções do processo.

## 4VIRTUAL INDUTAROR™

O aplicativo de simulação Virtual Indurator™ (Tata Consultancy Services) permite a otimização do processo de endurecimento de pelotas de minério de ferro em fornos de grelha móvel através de modelos matemáticos. A função principal do simulador é de fornecer base para tomadas de decisão, melhorando o processo e maximizando a produção do forno. O diagrama da Figura 4 apresenta a estrutura do aplicativo.

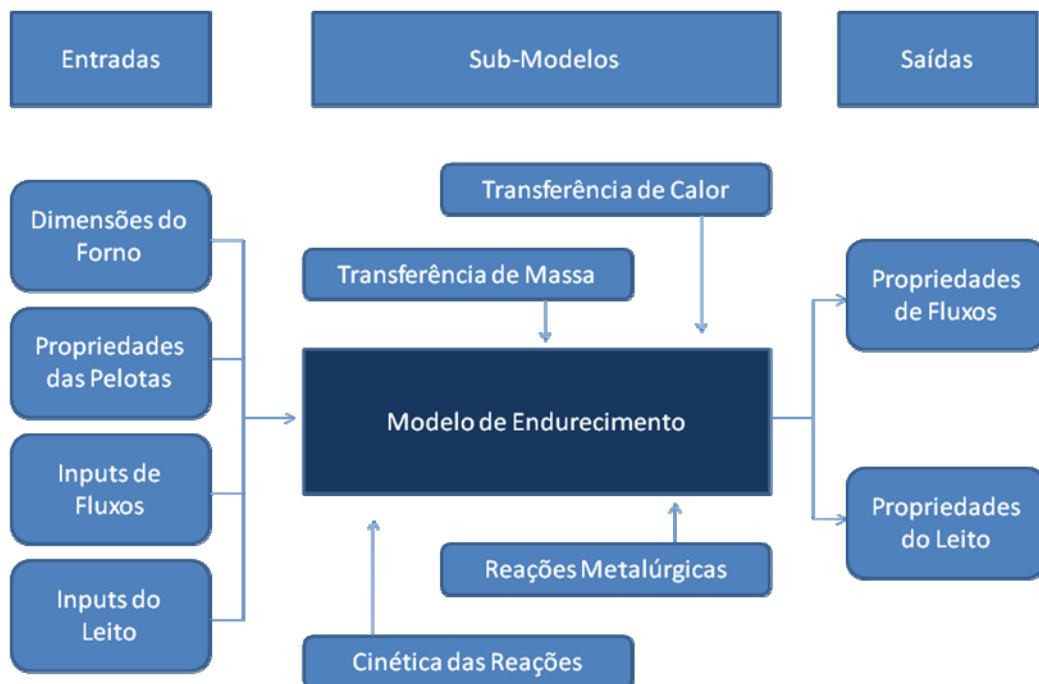


Figura 4 – Estrutura do Virtual Indurator™.

O Virtual Indurator™ opera em dois modos: *online*, quando o software adquire dados diretamente do processo e simula a condição atual da operação; *offline*: permitindo ao usuário inserir parâmetros na tela de dados e trabalhar diferentes cenários do processo. Ao final da simulação é possível a visualização dos resultados como, por exemplo, a localização e temperatura do *burn through point*, vazão de gás em diversos pontos no forno, qualidade esperada das pelotas, entre outros. Além disso, diversos perfis podem ser plotados, como os perfis de temperatura através do leito de pelotas é disponibilizado, conforme a Figura 5. Outras possibilidades são:

- perfil de temperatura do leito da pelota;
- perfil de umidade do leito da pelota; e
- perfil de carbono fixo do leito da pelota.

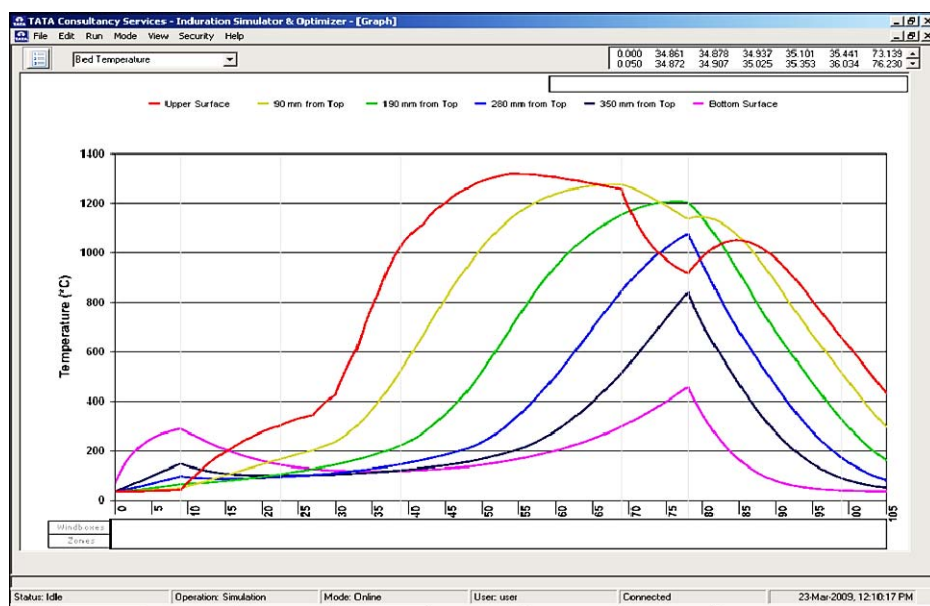


Figura 5 – Perfil de temperatura do leito de pelotas.

## 5 CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO DO FORNO DE PELOTIZAÇÃO

O presente trabalho utiliza o simulador de forno de pelletização, Virtual Indurator™, integrado ao controlador avançado de processo OptProcess®. Dessa forma, o OptProcess®, que é capaz de obter dados diretamente do processo, analisa e corrige essas informações e as envia para o simulador, recebendo de volta os resultados da simulação. A metodologia permite a obtenção de informações de processo mais confiáveis e um controle mais efetivo.

A Figura 6 apresenta o esquema simplificado do controle avançado de processos, onde o controle da queima é feito em duas instâncias:

- *Sistema Especialista*, onde o OptProcess® gerencia todas as regras de controle que retornam set points otimizados para o processo.
- *Modelo do Forno*, constituído pelo OptSim® que calcula valores não medidos ou de baixa disponibilidade do processo.

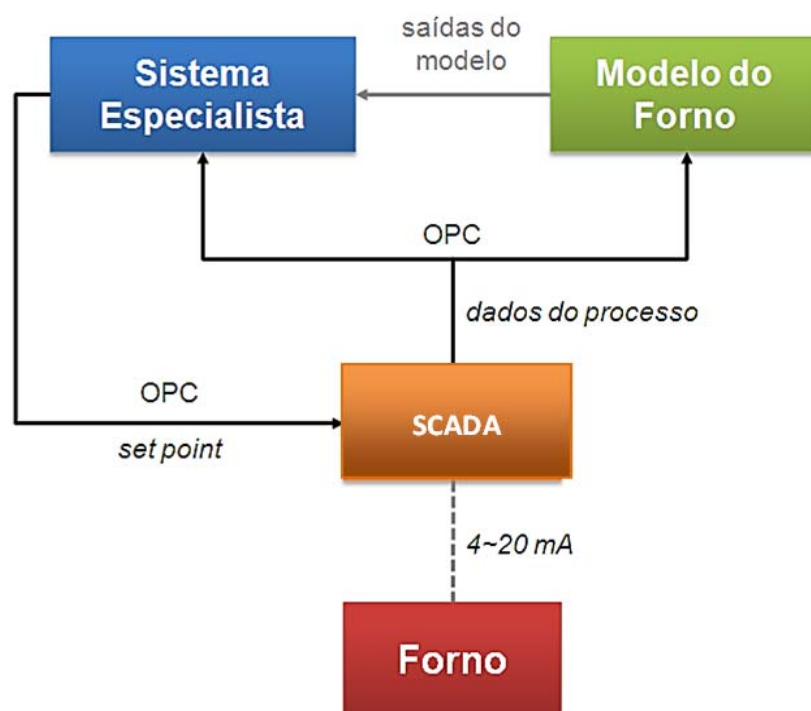


Figura 6 – Estrutura de aplicação do controle avançado de processos.

O sistema de controle avançado implementado na área da queima de uma usina de pelletização utiliza a base existente da estrutura de comunicação, obtendo informações disponíveis em sistemas como SCADA (ou *supervisory control and data acquisition*) através do protocolo OPC, que também recebem os *set points* otimizados.

O objetivo do controle é manter a qualidade das pelotas acima do requerido com o mínimo consumo energético e máxima produção. O entendimento do controle simplificado na seguinte lógica:

- (1) Se a qualidade é boa:
  - a. aumentar a produção líquida;
  - b. mas, se a produção estiver no máximo:
    - i. reduzir o consumo de energia :
      - reduzir velocidade do ventilador;

- ii. mas, se o ventilador estiver no mínimo :  
→ baixar o perfil de temperatura.

(2) Se a qualidade é ruim:

- a. aumentar o consumo de energia:
  - i. voltar o perfil de temperatura ao padrão;
  - ii. mas, se o perfil de temperatura já está no padrão:  
→ aumentar velocidade do ventilador;
  - iii. mas, se o ventilador no máximo:  
→ reduzir produção líquida.

O sistema especialista é responsável pela otimização dos *set points* de dois pontos de grande importância na produção de pelotas, a alimentação dos discos de pelotamento e o controle da alimentação da grelha, que é definido de acordo com a qualidade do produto e as condições de temperatura da caixa de vento da secagem e da queima.

A qualidade da pelota, quando adequada, a operação apresenta produção máxima e a velocidade dos ventiladores no mínimo, o sistema irá reduzir o perfil de temperatura visando economia energética. A qualidade é monitorada de forma a retomar o perfil de temperatura ao padrão assim que for detectada uma baixa na qualidade do produto. Essa estratégia só é permitida devido à base de dados dos perfis de temperatura fornecidos pela simulação.

O controle preditivo da velocidade do ventilador de recuperação visa manter a temperatura na caixa de vento perto do ótimo operacional, o que é conseguido através da antecipação do número de pelotas que estarão na zona de queima em função da velocidade e dimensões da grelha.

A temperatura do gás, na saída da zona de resfriamento, para uma boa operação, deve ser a máxima possível, sendo limitada pelo risco de queima da correia transportadora e dos ventiladores. O controle avançado de processo utiliza a relação entre vazão de ar e quantidade de pelotas, obtidos pela simulação, para prever a temperatura de saída do ar.

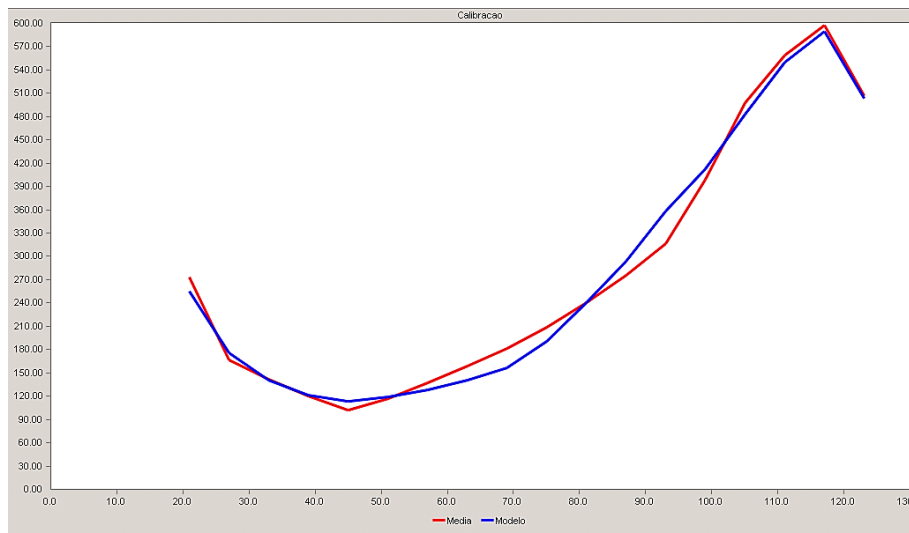
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tendências do índice de tamboramento, resistência a compressão a frio, além dos perfis de temperatura, carvão e umidade do leito de bolas são fornecidos pelo OptProcess<sup>®</sup>. As figuras de perfis, que serão mostradas a seguir, apresentam os valores das variáveis em estudo ao longo da extensão do forno (em metros).

A validação do modelo foi feita através do balanço de massa e energia do processo. Essa verificação advém da comparação entre as temperaturas das caixas de vento medidas na planta e as calculadas, dessa forma, quando houver o acordo entre os valores é possível afirmar a representatividade do processo pelo modelo de simulação. A Figura 7 apresenta o perfil de temperatura (em graus Celsius) nas caixas de vento nas zonas de pré-queima, queima e pós queima. A linha azul representa os valores obtidos pelo modelo matemático, enquanto a linha vermelha aqueles medidos no processo.

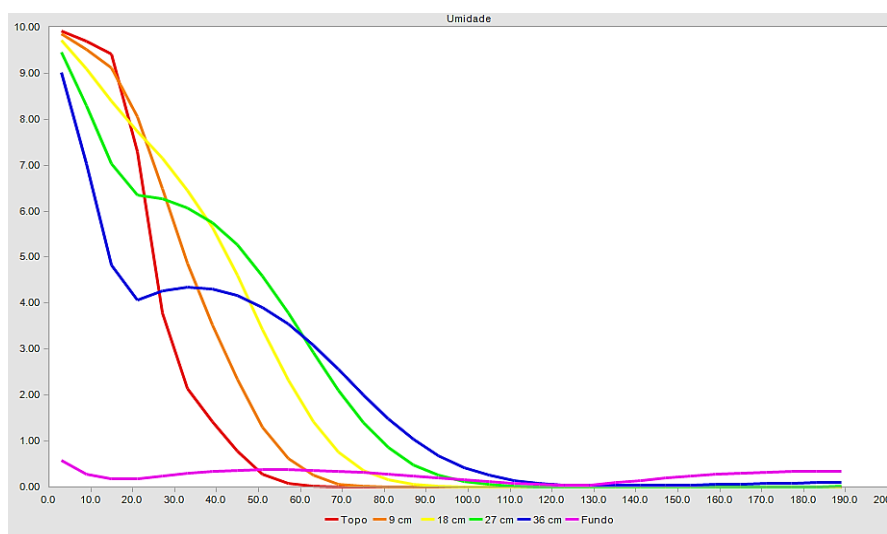
Dada a validação do modelo, as Figuras 8, 9 e 10 apresentam os perfis calculados de umidade (em porcentagem), temperatura (em graus Celsius) e carvão (em porcentagem), respectivamente em diferentes alturas do leito de pelotas. A linha vermelha, topo do leito, laranja a 9 centímetros abaixo do topo, amarela a 18 cm, verde a 27 cm, azul a 36 cm e rosa na camada de fundo do leito de pelotas.





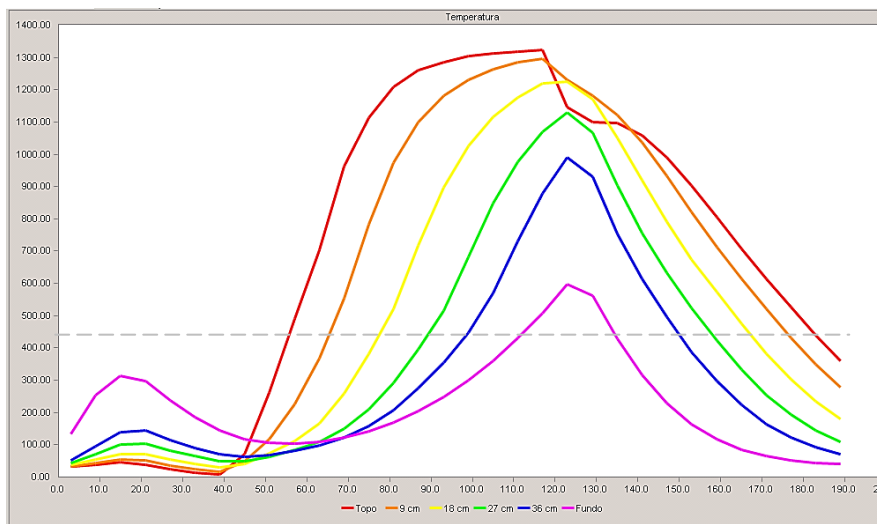
**Figura 7 – Curva de validação.**

Nota-se na Figura 8 a tendência decrescente esperada para a umidade ao longo do forno. Essa tendência só é invertida nas camadas inferiores do leito de pelotas na zona de transição da secagem ascendente para secagem descendente. Durante as etapas de secagem, a umidade das pelotas cruas, ao entrar em contato com o ar quente, é transferida para o ar. No fluxo descendente de gás na segunda parte da secagem o ar fica saturado de água, e ao entrar em contato com as camadas inferiores do leito, o ar carregado de água se condensa, aumentando então a umidade das pelotas dessas camadas.



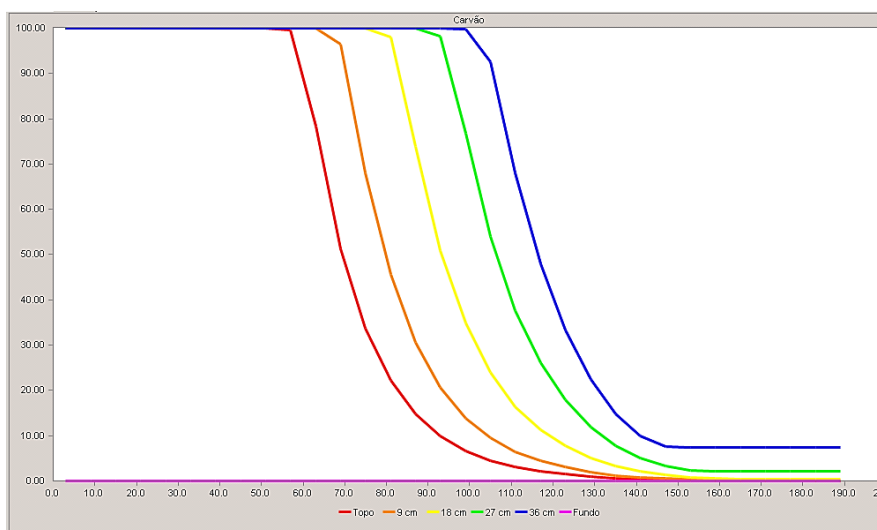
**Figura 8 – Perfil de umidade para diferentes alturas do leito de pelotas.**

A temperatura no leito de pelotas ao longo do forno é mostrada na Figura 9, estando em acordo com o descrito na literatura.<sup>(2)</sup>



**Figura 9** – Perfil de temperatura para diferentes alturas do leito de pelotas.

O perfil de perda de coque no leito de pelotas ao longo do forno é apresentado na Figura 10. O coque passa pela zona de pré-queima, onde inicia sua combustão, após as pelotas das camadas superiores do leito terem atingido a temperatura de ignição, aproximadamente 450°C. Nota-se o início do processo ocorrendo inicialmente nas camadas superiores, conforme a Figura 9. Na zona de queima as pelotas apresentam um pequeno percentual de resíduo de coque, devido ao pequeno intervalo de tempo em que permanecem a temperaturas superiores a 450°C.



**Figura 10** – Perfil de carvão para diferentes alturas do leito de pelotas.

Os dados oferecidos pelos gráficos são de fundamental importância e difíceis de serem obtidos na prática. A qualidade do material é obtida por regressões não-lineares de variáveis de processos, tanto aquelas medidas no processo quanto as inferidas pela simulação.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da integração do simulador Virtual Indurator™, que alia fenômenos físico-químicos, e o OptProcess®, como gerenciador de dados de entrada e saída, foi

possível obter parâmetros não medidos do processo da Samarco Ubu, que são de fundamental importância para o controle do forno de endurecimento de pelotas. O OptProcess apresenta-se como uma ferramenta robusta e confiável no controle avançado da pelotização. A melhoria no desempenho do processo advém da redução dos custos operacionais, aumento da produção e do atendimento das especificações do produto.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K. *Pelletizing of Iron Ores*. Springer-Verlag, 1980.
- 2 MAJUMDER, S.; NATEKAR, P.; RUNKANA, V. *Virtual Indurator™: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate*. *Computers and Chemical Engineering*. 33 (2009) 1141–1152.