

SOFT SENSOR PARA CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO DO FORNO DE PELOTIZAÇÃO¹

Rodrigo Cesar de Miranda²

Marco Aurélio Soares Martins³

Bruna Torres Negreiros Cordeiro Andrade⁴

Venkataramana Runkana⁵

Sushanta Majumder⁶

Resumo

Nas últimas décadas, os *soft sensors* estabeleceram-se como uma alternativa importante aos meios tradicionais de aquisição e monitoramento das variáveis críticas do processo, além de outras tarefas que estão relacionadas ao controle do processo. Esse artigo discute as características do processo de pelotização, ressaltando o forno de pelotização para produção de pelotas queimadas, que são críticas para o desenvolvimento de modelos fenomenológicos. Utiliza-se o Virtual Indurator™, simulador do forno de pelotização, integrado ao controlador avançado de processo OptProcess®. Dessa forma, o OptProcess® recebe on-line os valores do processo, analisa e corrige esses dados para entrada do simulador e critica os resultados obtidos da simulação. É esperado um aumento de produtividade por meio de um controle avançado de processos baseado em modelo, pois o mesmo terá informações de tendência do desempenho do processo antecipando resultados de laboratório, acarretando inclusive na estabilidade do mesmo.

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

SOFT SENSOR FOR ADVANCED PROCESS CONTROL FOR INDURATION FURNACES

Abstract

Over the last decades soft sensors were established as an important alternative to the traditional acquisition and monitoring of critical variables and other tasks related to process control. This paper discuss the pelletizing process characteristics, emphasizing the induration furnace for burned pellets production, that are critical for the development of sensors based on phenomenological models. This work uses Virtual Indurator™, a simulator for the induration furnace, combined to the advanced process controller OptProcess®. The software OptProcess® acquires online values of the process, analyses and corrects those data, sends it as input to the simulator and evaluate the results obtained from the simulation. An increase of productivity as the result of the advanced control with the model is expected, as the model has information about the tendency of the process performance by anticipating laboratory results, leading also to a stability of these values.

Key words: Pelletizing; Soft sensor; Advanced process control; Simulation.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES Eng. Químico MSc, Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

² Eng. Minas, Operações, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

³ Química, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

⁴ Eng. Ambiental PhD – Tata Consultancy Services Ltd.

⁵ Eng. Químico – Tata Consultancy Services Ltd.

1 INTRODUÇÃO

Para alimentar um alto forno ou um forno de redução direta de ferro, o concentrado de minério do tipo *pellet feed* deve passar pelo processo de pelletização, no qual esse é transformado em pequenas esferas endurecidas. A resistência mecânica e características metalúrgicas apropriadas conferidas às pelotas ocorrem quando as mesmas são submetidas a um processamento térmico no forno de pelletização.

Com o principal objetivo de garantir o melhor desempenho dos fornos de pelletização, é crucial a redução de seus custos operacionais aumentando sua produção sem haver alterações no padrão de qualidade. Neste contexto estão inseridos projetos que utilizam controle avançado de processo (APC, do inglês *advanced process control*), que é uma das ferramentas com a melhor relação custo-benefício para a melhoria do desempenho de uma usina. Dentre os inúmeros tipos de APCs, é recomendada a utilização de sistemas especialistas para processos altamente não-lineares. Assim, o sistema especialista mostra-se como uma ferramenta robusta e confiável para o controle avançado do forno de pelletização. Seus resultados no forno apresentam um aumento produtivo, redução em energia e redução no desvio padrão da qualidade.

O sistema de controle avançado OptProcess[®] tem como base o sistema especialista, auxiliado com módulos de estatística, modelamento matemático, redes neurais e outros, que o torna capaz de avaliar o processo como um todo e tomar decisões assertivas baseadas em variáveis lidas do processo.

Nas últimas décadas, os *soft sensors* estabeleceram-se como uma alternativa importante aos meios tradicionais de aquisição e monitoramento das variáveis críticas do processo, além de outras tarefas que estão relacionadas ao controle do processo. Assim, os sensores baseados em *soft sensor* já demonstraram sua enorme utilidade e possuem uma crescente popularidade nas indústrias, embora ainda não atingiram todo seu potencial de utilização.⁽¹⁾

Baseado em modelos matemáticos, o Virtual Indurator[™] simula o forno de pelletização a partir de dados do processo. Esse simulador foi desenvolvido a partir de princípios fundamentais de balanço de massa, transferência de calor, cinética de reações químicas e fluxo de gás através de meios porosos. O Virtual Indurator[™] também age como *soft sensor*, fornecendo informações que auxiliam na tomada de decisões e controle do processo, estimando valores que são de difícil acesso, como temperatura dos gases e temperatura do leito de pelotas.⁽²⁾

O presente trabalho utiliza o Virtual Indurator[™] integrado ao sistema de controle avançado de processo OptProcess[®]. Dessa forma, o OptProcess[®] recebe on-line os valores do processo, analisa e corrige esses dados para entrada do simulador e critica os resultados obtidos da simulação. Isto possibilita a obtenção de resultados mais confiáveis para o controle efetivo do processo. É esperado um aumento de produtividade por meio de um controle avançado de processos baseado em modelo, pois o mesmo terá informações de tendência do desempenho do processo antecipando resultados de laboratório, acarretando inclusive na estabilidade do mesmo.

2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS PELOTAS

A Figura 1 mostra esquematicamente o processo de produção de pelotas, desde o transporte do *pellet feed* até o carregamento do navio com as pelotas. A descrição detalhada do processo de produção de pelotas poderá ser encontrada em Meyer.⁽³⁾

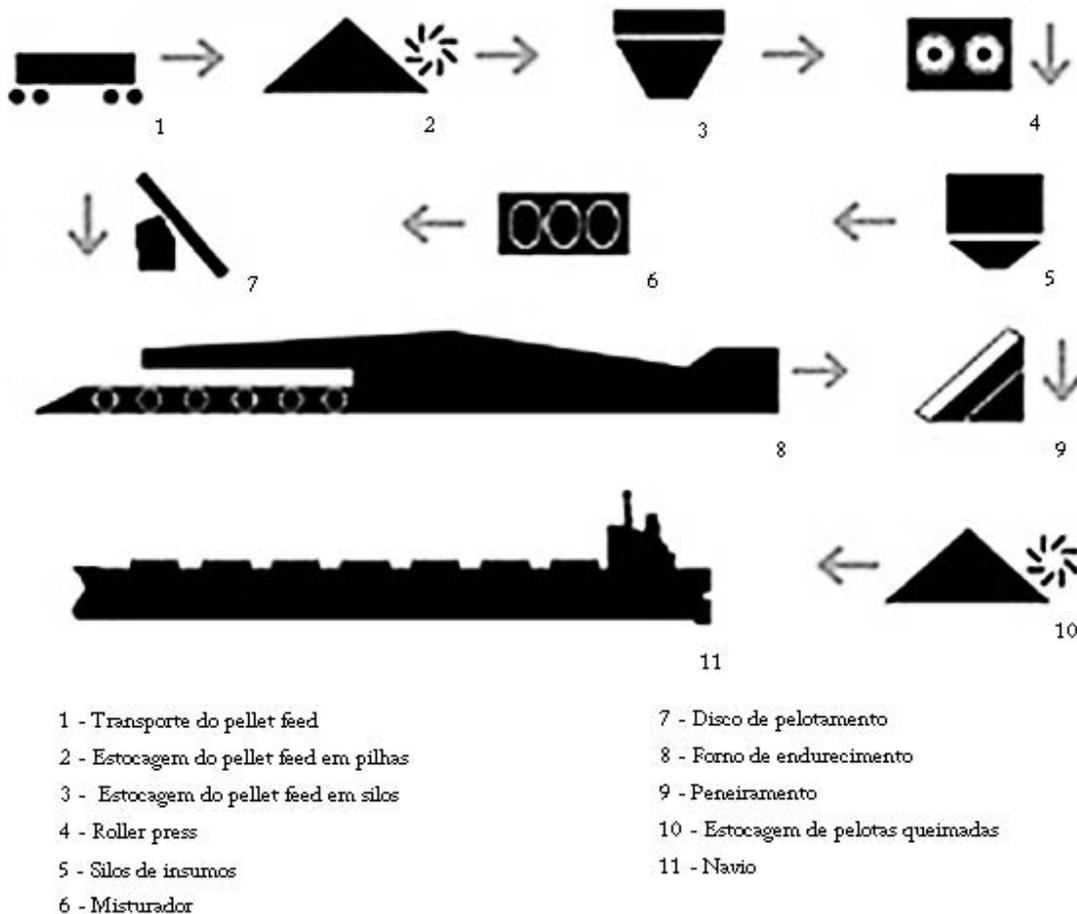


Figura 1. Processo de produção de pelotas.

A matéria prima das pelotas de minério de ferro é o minério do tipo *pellet feed*, que é a fração do minério com pelo menos 85% do passante menor que 45 μm e teor de sílica em torno de 3%.

Inicialmente o *pellet feed* passa por um *Roller Press*, que é responsável pela cominuição do minério, com o objetivo de adequar a superfície específica do material para a etapa de pelotamento.

Os insumos de calcário, carvão e aglomerantes são preparados, dosados e homogeneizados junto ao *pellet feed*, formando uma mistura homogênea a ser utilizada no processo de pelotamento. A adição de insumos permite ajustar a qualidade química, pelo calcário; melhorar formação da pelota crua, pelo aglomerante; e fornecer energia térmica na etapa de queima, pelo carvão.

No pelotamento a mistura de *pellet feed* e insumos são trabalhados nos discos de pelotamento para adquirir a forma e a granulometria adequada para etapa de queima no forno de endurecimento. O produto dos discos é classificado na mesa de rolos, para eliminar pelotas de tamanhos indesejáveis ao processo, melhorando a permeabilidade do leito de pelotas cruas. O rejeito das mesas de rolos retorna para a alimentação dos discos de pelotamento, fazendo um circuito fechado.

No forno de endurecimento, as pelotas são submetidas a um tratamento térmico cuidadoso e balanceado, o que as proporciona resistência física e mecânica apropriada. A esse tratamento dá-se o nome de processo de endurecimento ou processo de queima. Depois de queimadas, as pelotas são classificadas no peneiramento, sendo o rejeito classificado como *pellet screening* e as pelotas direcionadas para as pilhas de material conforme, para posterior embarque.⁽⁴⁾

3 OPTPROCESS®

A maior limitação das estratégias clássicas de controle na indústria mineral e metalúrgica reside no fato de que as inter-relações entre as várias variáveis do processo são não-lineares. Associa-se a esse problema a impossibilidade de se medir variáveis importantes que afetam o processo. A tecnologia de controle avançado de processo oferece numerosas alternativas para isso, principalmente a utilização de modelos físicos do processo. Os modelos matemáticos dinamicamente calibrados permitem calcular variáveis não medidas que explicam as variações do processo e podem ser utilizadas como variáveis virtuais. Esse conjunto completo de variáveis medidas e calculadas aliado a técnicas avançadas de controle como sistemas especialistas, por inferência de lógica nebulosa, pode ser utilizado em um eficiente sistema de controle avançado de processo.

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 (Figura 2), 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 2. Estrutura modular do sistema.

Os módulos utilizados no presente trabalho são sucintamente descritos abaixo:

- 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 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 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.

5 VIRTUAL INDURATOR™

O Virtual Indurator™ é uma ferramenta para simulação e otimização do processo de endurecimento de pelotas de minério de ferro em fornos de grelha móvel, baseado em modelos matemáticos fundamentais. Desenvolvido pela Tata Consultancy Services, esse simulador também opera como *soft sensor* calculando parâmetros que não são possíveis obter diretamente do processo. As principais funções da ferramenta são proporcionar variáveis de decisão de aconselhamento, melhorando o processo e maximizando a produção do forno, dentro de suas limitações e restrições de qualidade. A estrutura do modelo está esquematizada na Figura 3.

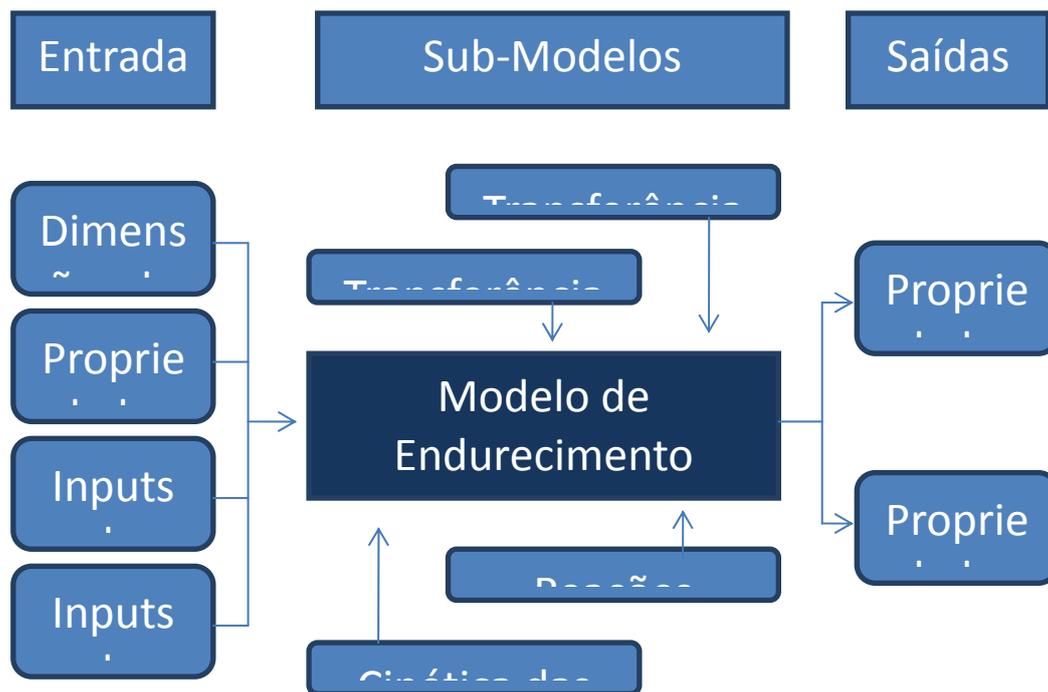


Figura 3. Estrutura do Virtual Indurator™.

A simulação pode ser usada tanto on-line, na qual o aplicativo adquire dados do processo e do servidor do laboratório e simula a condição atual do processo; quanto *off-line*, na qual o usuário pode inserir parâmetros na tela de dados e simular cenários diferentes do processo. Após completar a simulação, é possível visualizar os resultados da simulação como a localização e temperatura do *burn through point*, vazão de gás das várias zonas do forno, predição da qualidade da pelota, entre

outros. Além disso, tem-se a possibilidade de acessar telas de relatório (Figura 4) que apresentam vários perfis através do leito da pelota na forma gráfica, como:

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

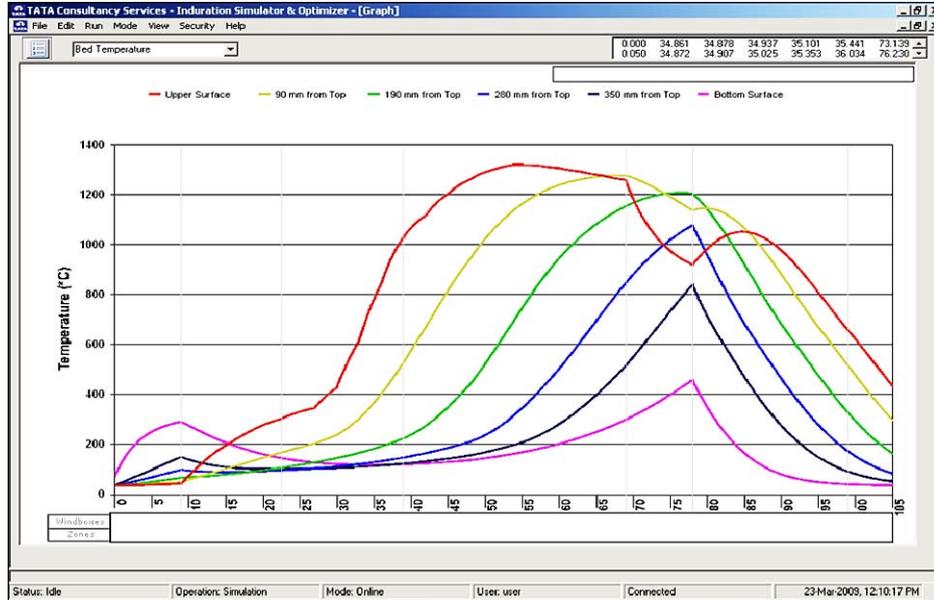


Figura 4. Soft-sensor do perfil de temperatura do leito de pelotas.

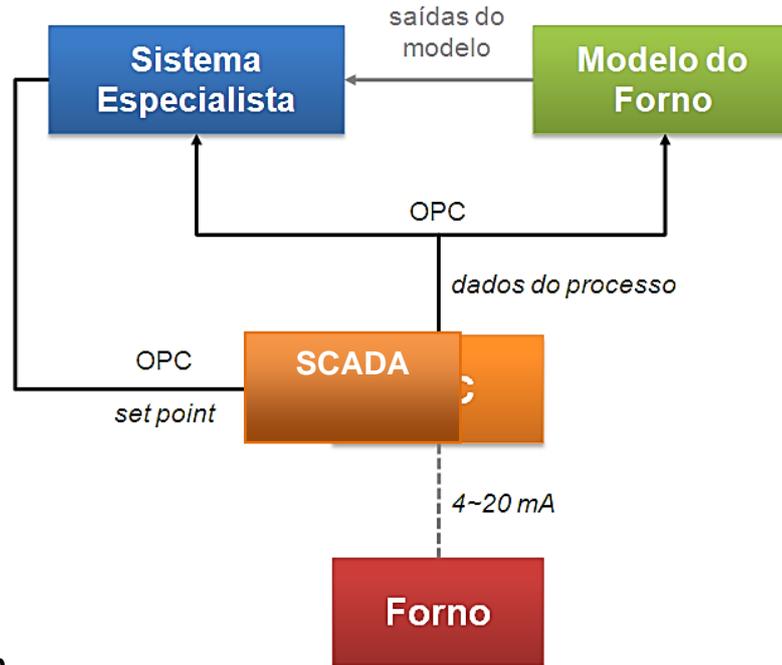
6 CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO DO FORNO DE PELOTIZAÇÃO

O presente trabalho utiliza o Virtual Indurator™, simulador do forno de pelotização, integrado ao controlador avançado de processo OptProcess®. Dessa forma, o OptProcess® recebe on-line os valores do processo, analisa e corrige esses dados para entrada do simulador e critica os resultados obtidos da simulação. Isto possibilita a obtenção de resultados mais confiáveis para o controle efetivo do processo. Esse sistema é chamado de OptSim®.

A Figura 5 apresenta a estrutura do sistema de controle avançado de processos. Esse sistema inclui duas instâncias para o controle da queima:

- 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.

- supervisory control and data



acquisition

Figura 5. Estrutura de aplicação do controle avançado de processos.

O sistema de controle avançado é implantado na área de queima de uma usina de pelotização, utilizando estrutura existente de comunicação. O OptProcess[®] adquire informações do processo disponíveis no SCADA (do inglês, *supervisory control and data acquisition*) ou similares, através do protocolo OPC. Os *set points* otimizados também são enviados ao processo via OPC.

O objetivo do controle é de maximizar a produção e minimizar o consumo energético, com a qualidade de pelotas acima do mínimo requerido. A filosofia do controle pode ser resumida da seguinte forma:

- 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.
- 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 possui dois importantes controles relativos à produção, sendo esses: (1) o controle do *set point* de alimentação de cada disco do pelotamento e (2) o controle do *set point* de alimentação líquida da grelha. Para o ajuste de alimentação líquida na grelha, analisa-se o resultado de qualidade e as condições do forno (temperatura da caixa de vento da secagem descendente e da queima).

Também é acertado pela tendência da qualidade dada pela compressão e, ou, tamboramento avaliada pela instância Modelo do Forno.

O perfil de temperatura é manipulado apenas em último caso, na falta de possibilidade de manipular a produção e os ventiladores. Quando a qualidade de pelota queimada é adequada, a produção está no máximo e os ventiladores estão no mínimo, o sistema abaixará o perfil de temperatura para economizar energia. Assim que a qualidade de pelota não estiver adequada, o perfil de temperatura volta ao *set point* padrão.

O bom desempenho das estratégias descritas acima, depende da atuação nos ventiladores e observação dos fluxo de ar dentro do forno, apenas possível através do modelo.

A manipulação do ventilador de recuperação pela produção é feita através da quantidade de pelotas que está na zona de queima. Essa quantidade de pelotas é calculada pelo modelo, considerando a alimentação líquida, a velocidade e as dimensões da grelha. Através desse controle antecipativo, visa-se manter a temperatura da caixa de vento dentro da faixa requerida.

O principal objetivo do controle de resfriamento é de manter a temperatura da pelota queimada e do gás de saída da zona de resfriamento abaixo do limite máximo, para prevenir a queima da correia transportadora ou dos ventiladores. Isso é possível através da relação entre ar e quantidade de pelotas, ambas estimadas pelo modelo.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os principais resultados fornecidos pelo OptSim[®] são as tendências de qualidade, dadas pelo tamboramento e resistência a compressão a frio, além dos perfis de carvão, temperatura e umidade do leito de pelotas.

O critério de validação do modelo fundamenta-se nos balanços de massa e energia deste processo. Sua verificação advém da comparação das temperaturas das caixas de vento medidas com os valores calculados. Assim, se os cálculos estiverem adequados, tanto os valores medidos quanto os calculados deverão ser similares. A Figura 6 apresenta a curva de calibração obtida, na qual pode ser observada a coerência entre o perfil de temperaturas das caixas de vento das zonas de pré-queima, queima e pós-queima do forno de pelotização. A linha azul representa o perfil de temperatura calculada e a linha vermelha o perfil de temperatura medida.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os gráficos dos perfis de umidade, temperatura e carvão, respectivamente. Cada linha representa um perfil da variável analisada em relação a uma determinada altura do leito de pelotas. A linha vermelha representa o topo do leito, a laranja 9 cm abaixo do topo, a amarela 18 cm abaixo do topo, a verde 27 cm abaixo do topo, a azul 36 cm abaixo do topo e a rosa a camada de fundo.

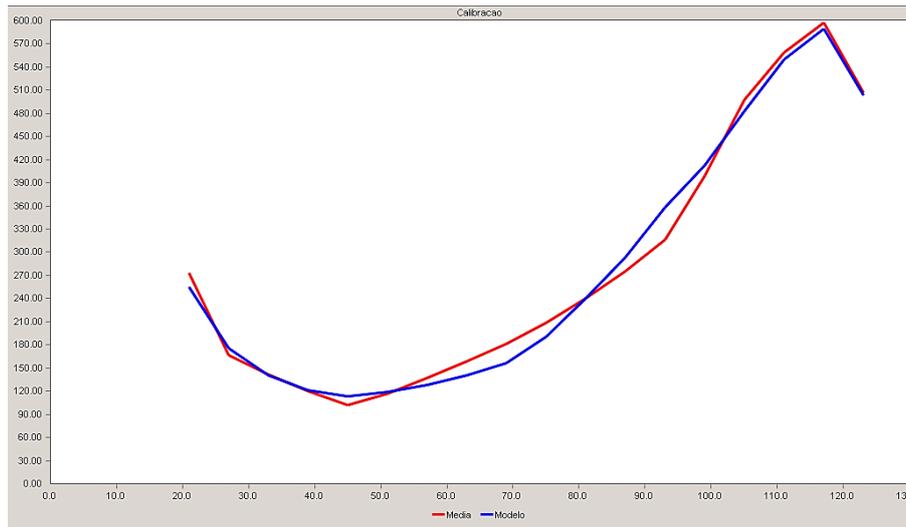


Figura 6. Curva de calibração.

Observa-se na Figura 7 que a umidade decresce ao longo do forno, como era esperado. Também pode ser observada uma inversão da tendência do comportamento do perfil de umidade nas camadas inferiores do leito de pelotas na transição da secagem ascendente para a 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.

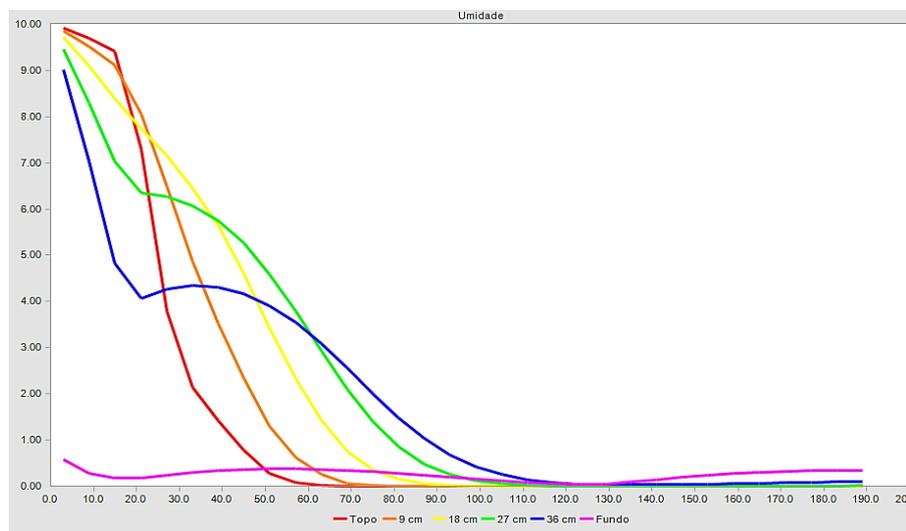


Figura 7. Perfil de umidade para diferentes alturas do leito de pelotas.

A Figura 8 apresenta o perfil de temperatura no leito de pelotas ao longo do forno. Este perfil de temperatura está de acordo com o que é descrito pela literatura.⁽²⁾

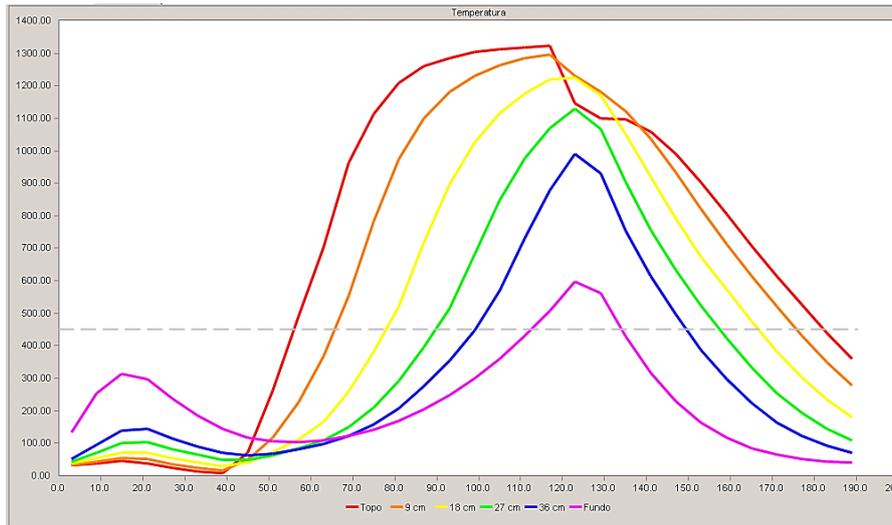


Figura 8 Perfil de temperatura para diferentes alturas do leito de pelotas.

A Figura 9 apresenta o perfil de perda de coque no leito de pelotas ao longo do forno. O coque inicia sua combustão na zona de pré-queima, após as pelotas das camadas superiores do leito atingirem a temperatura de ignição, aproximadamente 450°C . As camadas superiores começam esse processo antes das inferiores, pois essa temperatura é atingida mais rapidamente (Figura 8). Nas camadas 27 e 36 cm abaixo do topo a combustão ocorre apenas a partir da zona de queima, e as pelotas apresentam um pequeno percentual de resíduo de coque devido ao curto tempo que o material passa em temperaturas superiores a 450°C . Essa quantidade porém não é significativa para sua qualidade final.

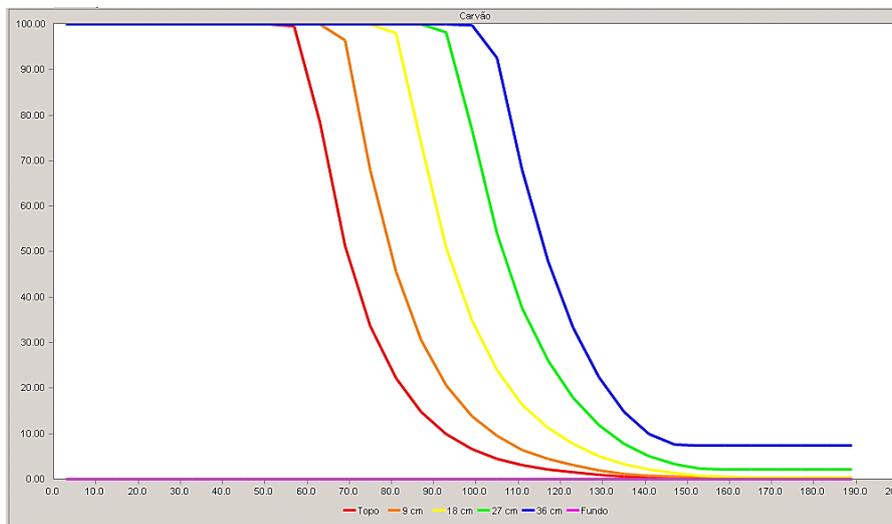


Figura 9. Perfil de carvão para diferentes alturas do leito de pelotas.

As informações fornecidas pelos gráficos não são medidas triviais de serem obtidas no processo dadas dificuldades intrínsecas. Esses dados são relevantes para o acompanhamento da qualidade da pelota, uma vez que são fatores que influenciam as propriedades das pelotas queimadas.

Os modelos da qualidade de tamboramento e compressão são obtidos através de regressões não-lineares de variáveis do processo da queima. Essas regressões utilizam-se dos valores medidos diretamente do forno, como também de valores calculados pelos modelos termodinâmicos do Virtual Indurator™. Para o controle do

processo, mais importante que o valor exato dos parâmetros de qualidade é a tendência de seu comportamento. Essa tendência foi verificada e validada durante o trabalho. Pela análise do modelo foi observado que parâmetros não medidos, como o fator térmico e a porosidade do leito, possuem uma influência significativa nos valores de qualidade. Tais parâmetros são calculados através do *soft sensor*, e assim, com o monitoramento dessas variáveis é possível melhor estabilidade do tamboramento e compressão.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O OptSim[®] apresenta-se como uma ferramenta de simulação dinâmica rigorosa baseada nos modelos fundamentais do processo de queima. Através da combinação do modelo Virtual Indurator[™], que incorpora importantes fenômenos físico-químicos, e o OptProcess[®] como gerenciador de dados de entrada e saída, foi possível a obtenção de variáveis não medidas para auxiliar no controle de um forno de endurecimento de pelotas.

O sistema de controle avançado OptProcess[®] com base no sistema especialista e auxiliado com modelamento matemático mostra-se como uma ferramenta robusta e confiável para o controle avançado do forno de pelletização. Com o objetivo principal de garantir o melhor desempenho do processo, ocorre a redução dos custos operacionais aumentando sua produção sem haver alterações no padrão de qualidade.

É esperado um aumento de produtividade por meio de um controle avançado de processos baseado em modelo, pois o mesmo terá informações de tendência do desempenho do processo antecipando resultados de laboratório, acarretando inclusive na estabilidade do mesmo.

REFERÊNCIAS

- 1 KALDEC, P.; GABRYS, B.; STRANDT, S. *Data-Driven Soft Sensors in the Process Industry*. Computers and Chemical Engineering. 33 (2009) 795-814.
- 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.
- 3 MEYER, K. *Pelletizing of Iron Ores*. Springer-Verlag, 1980.
- 4 MONTEIRO, A. M.; BRAGA, A. P.; CARVALHO, B. P. R. *Modelagem Neural de um Processo de Produção de Pelotas de Minério de Ferro*. VII Seminário de Automação de Processos da ABM, 2003.