

INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA CONTROLE PREDITIVO DE NÍVEL ¹

*Alcides Miranda do Amaral*²
*Eder Jose Coelho Magalhães*³
*Eduardo Soares Figueiredo*⁴
*José Amador Ribeiro Ubaldo Filho*⁴

Resumo

Este artigo apresenta o projeto de um controle preditivo de nível, baseado em técnicas de inteligência computacional. O controlador preditivo foi implementado para controle do nível da tremonha de alimentação da Máquina de Sinter, pertencente à planta de Sinterização da Gerdau Açominas. O projeto em questão utilizou técnicas de Redes Neuro-Fuzzy e Redes Neurais Artificiais para modelamento do processo. O processo de alimentação da tremonha possui considerável tempo morto de resposta à ação de controle, devido ao trajeto percorrido pela matéria-prima nos transportadores de correia, desde os silos de estocagem até Máquina de Sinter. Por este motivo, a ação de controle tradicional possui a sua eficiência comprometida, mostrando-se oscilatória durante a maior parte do tempo. O controle preditivo foi proposto com o objetivo de tornar o processo mais estável, por meio da redução da oscilação da ação de controle do nível da tremonha de alimentação da Máquina de Sinter. A redução da variabilidade da ação de controle contribui diretamente para a estabilidade operacional do processo de produção de sinter. Os ganhos mensurados são tanto quantitativos ao impor um ritmo de produção mais estável, quanto qualitativos ao preservar a qualidade da matéria-prima utilizada.

Palavras-chave: Inteligência computacional; Controle preditivo; Nível; Sinterização.

COMPUTING INTELLIGENCE IN PREDICTIVE LEVEL CONTROL

Abstract

This paper presents the project of a predictive level control, based on techniques of computing intelligence. The predictive controller was applied on level control of sinter machine feeding, in Sintering Machine at Gerdau Açominas. This project used techniques of Neuro-Fuzzy Network and Artificial Neural Network for process modeling. The process of sinter machine feeding has a considerable dead time in control action reply, due to raw material traveling from the storage bin to sintering machine feeding. For this reason, traditional action control has low efficiency, revealing oscillatory response during most of time. The predictive controller was projected to increase operational stability, by reducing control action oscillation in level control. The reduction in control action variability contributes directly in process operational stability of sinter production. The profits are in such way quantitative, when imposing a production rhythm, as much qualitative, when preserving quality of the used raw material.

Key words: Computing intelligenc; Predictive control; Level; Sintering.

¹ *Trabalho técnico apresentado ao X Seminário de Automação de Processos, 4 a 6 de outubro de 2006, Belo Horizonte – MG.*

² *Técnico de Processo - Gerdau Açominas*

³ *Facilitador Produção – Gerdau Açominas*

⁴ *Analista de Sistemas Industriais – Gerdau Açominas*

1 INTRODUÇÃO

Nas grandes metalúrgicas, o processo de produção do ferro-gusa é realizado nos altos-fornos, utilizando como fonte de ferro minérios granulados e/ou aglomerados. O processo de sinterização possui como objetivo principal permitir o aproveitamento de minérios com granulometria inferior a 6 mm como matéria-prima na produção do ferro-gusa. Esses grãos de minério, denominados finos de minério, não podem ser utilizados diretamente nos altos-fornos, pois compromete a permeabilidade da carga ao dificultar a passagem dos gases, condição imprescindível ao bom desempenho do alto-forno.

Na sinterização convencional toda a matéria-prima utilizada é composta por finos de minério. No processo de produção da sinter os pós-metálicos, geralmente compactados, são ligados por aquecimento a uma temperatura pouco abaixo do ponto de fusão da mistura.

No processo de sinterização da Gerdau Açominas as matérias-primas utilizadas pela planta de Sinterização são provenientes do processo de sinterização convencional ou pelo processo denominado HPS - Hybrid Pelletized Sinter. Este último processo envia à máquina de sinter uma mistura de finos de minérios com granulometria entre 4 e 4,5 mm e coque, que serão queimados para produção do sinter. Neste processo, em cada um dos 7 silos do HPS, os finos de minério são dosados em um disco para aglomeração, sendo posteriormente depositados nas correias transportadoras de alimentação da máquina de sinter.

O volume de material enviado dos silos à máquina de sinter é pesado por uma balança e armazenado em uma tremonha, antes de entrar na Máquina de Sinter. Esta mistura sofre um aquecimento na superfície da esteira e, através de uma sucção ao longo da máquina, ocorre a queima de toda a matéria-prima, produzindo o sinter ao final do processo.

A estabilidade no controle do nível da tremonha de alimentação garante a estabilidade operacional da Máquina de Sinter, uma vez que a mesma pára por nível muito baixo da tremonha. Além disto, garante também a estabilidade operacional do HPS, pois um nível alto da tremonha gera uma interrupção em todo o sistema de alimentação da mesma. O processo de alimentação da tremonha possui um considerável tempo morto de resposta à ação de controle, algo em torno de 250 segundos, tempo este necessário para que uma unidade medida na balança dos silos chegue até a tremonha. Este elevado tempo de resposta da planta à ação de controle limita a eficiência do controle de nível, quando realizado por controlador tradicional. Por este motivo, foi proposta a implementação de um controle preditivo, que permita realizar ações de controle antecipadas com o auxílio de um modelo da variação do nível da tremonha.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Técnicas de controle mais sofisticadas normalmente utilizam um modelo do processo, que pode ser obtido a partir de leis físicas ou por meio de técnicas de identificação de processos. O projeto de um modelo por meio das leis físicas implica no pleno conhecimento do sistema, condição dificilmente encontrada em um processo industrial real. Em geral, pela falta de conhecimento dos detalhes do processo industrial, a identificação do modelo é realizada utilizando técnicas de identificação que utilizam os sinais de entrada e saída para obtenção de modelos lineares.

É amplamente difundida no meio acadêmico a utilização de estruturas neuro-fuzzy para controle de processos multivariáveis e intrinsecamente não-lineares. Outra técnica de identificação normalmente utilizada para este tipo de controle utiliza redes neurais artificiais. Estas técnicas são mais difundidas em indústrias químicas e siderúrgicas, que as utilizam em projetos de preditores multivariáveis de processos reais não-lineares.

Este artigo vem apresentar o projeto do controle preditivo do nível da tremonha de mistura da Máquina de Sinter da Gerdau Açominas. Foram utilizadas técnicas baseadas em rede neuro-fuzzy e rede neural artificial para obtenção do modelo do sistema e implementação do controle preditivo.

O projeto do preditor consiste de três etapas: no primeiro busca-se a identificação dos parâmetros da planta que serão utilizados, no segundo realiza-se o treinamento da rede e obtenção do preditor (controle futuro baseado nos dados atuais e passado), no terceiro e último, utilizamos a saída do preditor como entrada de controle atual do processo.

As redes neurais são técnicas capazes de inter-relacionar múltiplas entradas com as saídas do sistema. A saída da rede é treinada para que se aproxime da saída real do sistema, para tal, utiliza apenas informações atuais e históricas do processo. Quando realizamos com sucesso o treinamento da rede, conseguimos generalizar a sua resposta. Isto significa que a rede apresenta resposta semelhante à do sistema real, mesmo para um conjunto de dados não apresentado durante a etapa de treinamento. Este é um dos motivos pelos quais as redes neurais são tão utilizadas no controle de sistemas multivariáveis.

São de fundamental importância à performance da rede neural a correta coleta, seleção e condicionamento dos dados, que serão apresentados como entradas e saídas da rede durante o seu treinamento. Após uma análise preliminar, realizada em conjunto com a equipe de operação da planta, foram escolhidas as seguintes informações do processo para realização da coleta inicial de dados e análise correlacional entre os mesmos:

Sinais de entrada da rede:

- Valor Dosado na Balança HPS [ton/h];
- Densidade da mistura [kg/m²];
- Velocidade máquina sinter [m/s] e
- Altura da camada de sinter [mm].

Sinal de saída da rede:

- Variação do nível tremonha [%]

A massa de dados foi coletada em uma semana de operação normal do processo. Os dados coletados foram filtrados para eliminação de ruídos de medição identificados durante a análise preliminar

Abaixo são apresentadas as correlações entre os sinais de entrada e o de saída do sistema.

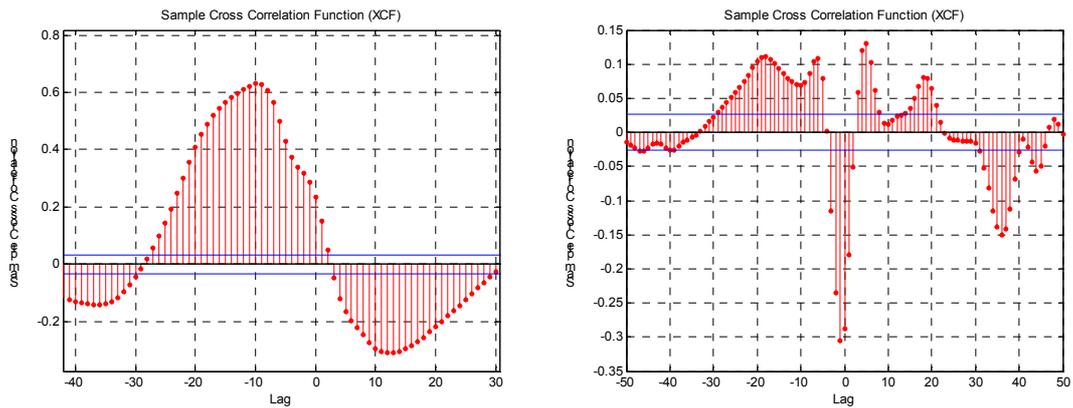


Figura 1. Correlação entre os sinais da Variação Nível da Tremonha e Peso Balança HPS e dos sinais Variação Nível da Tremonha e Produção de sinter.

Com o resultado da análise correlacional em mãos, foi possível determinar as informações de maior contribuição à dinâmica do processo e os respectivos atrasos de tempos. Verificamos assim a dependência de cada entrada para a saída da rede.

Verificamos que a maior correlação entre a variação do nível da tremonha e o peso da balança acontece no instante -10 . Desconsiderando o atraso de dois instantes de tempo inserido pelo filtro, a real correlação acontece 8 instantes de tempo atrás. Esta correlação mostra que variações no peso na balança levam aproximadamente 224 segundos para causar variação do nível da tremonha.

Verificamos que a produção de sinter possui interferência quase que instantânea na variação do nível da tremonha. A produção de sinter afetará o nível da tremonha apenas quando houver alteração do patamar de produção.

Ao treinar-se a rede, queremos obter em sua saída uma predição da variação do nível da tremonha 250 segundos à frente. O valor do nível da tremonha, previsto para 250 segundos à frente, é obtido ao somarmos ao valor do nível atual o valor da variação predita pela rede neural.

Ao realizar o controle do nível 250 segundos à frente, busca-se estabilizar a resposta do controlador. Acredita-se ser possível melhorar o controle do nível da tremonha ao realizar o controle em 'n' instantes de tempo à frente, mesmo com pequeno erro do valor previsto em relação ao futuro valor real. Realizar o controle para o instante atual, mas com um grande tempo morto na resposta do sistema, impõe uma ação de controle oscilatória ao processo. Ao utilizar o valor de nível predito como parâmetro de correção do setpoint do controlador, é implementando o controle de nível para 'n' instantes de tempo à frente.

O nível da tremonha era controlado originalmente por um controlador PI+FeedForward, que foi mantido na implementação do controle preditivo. Este controlador foi re-sintonizado após a implantação do controlador preditivo e o seu erro de controle passou a ser corrigido pelo preditor de nível.

3 RESULTADOS

É utilizado como referência, para critério de comparação dos resultados obtidos, o modelo Naive. Este modelo consiste em apresentar o valor atual do modelo como sendo o valor real do processo atrasado de um instante de tempo.

3.1 Projeto do Modelo da Variação do Nível da Tremonha Utilizando Técnicas de Rede Neuro Fuzzy

Para identificação do modelo da variação do nível da tremonha de alimentação da Máquina de Sinter, foi proposta inicialmente a utilização do método de identificação de sistemas dinâmicos por redes neurais nebulosas.

Foram projetados modelos para predição da variação do nível da tremonha 250 segundos à frente, utilizando de 1 a 14 instantes de tempo passados. Foram obtidos 5 modelos para cada atraso de tempo determinado, gerando um total de 70 modelos projetados.

Nas figuras abaixo apresentamos os erros quadráticos obtidos para cada um dos modelos encontrados. No eixo das coordenadas são apresentados os valores dos Erros do Modelo (em vermelho), Erro Naive (em Azul) e Erro Médio do Modelo (em preto); no eixo das abscissas temos quantos atrasos de tempo foram utilizados para fazer a predição.

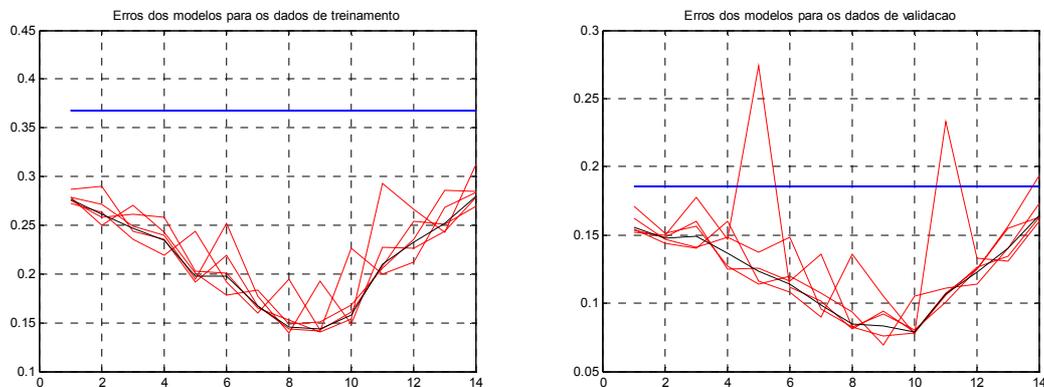


Figura 2. Comparação dos erros apresentados pelo Modelo Obtido e pelo Modelo Naive – para os dados de treinamento e validação.

Conforme pode ser observado, os modelos que apresentaram menor erro quadrático são os modelos que utilizam 8 a 10 atrasos, semelhante ao que foi verificado na correlação. Levando em consideração os resultados encontrados ao validarmos o modelo e as correlações entre os sinais, definimos que o melhor modelo a ser implementado é o preditor de 10 instantes de tempo.

Obtivemos os seguintes resultados para a previsão da variação do nível da tremonha 1 instante de tempo à frente:

Tabela 1. Quadro comparativo da rede neuro-fuzzy treinada.

Quadro Comparativo da Rede Neuro-Fuzzy Treinada		
	Erro do Modelo Naive	Erro do Modelo Neuro-Fuzzy
Varição do nível (dados de treinamento)	0.2914	0.0917
Varição do nível (dados de validação)	0.1855	0.0684

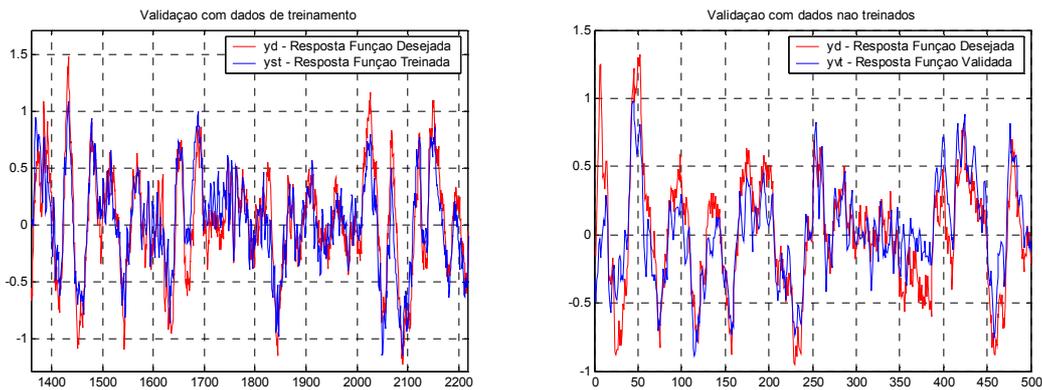


Figura 3. Validação do Modelo da Variação do Nível da Tremonha com os dados de treinamento e validação.

Os resultados obtidos com o modelo estão muito próximos dos valores reais, e apresentam erro aproximadamente 3 vezes menor do que o erro apresentado pelo Modelo Naive.

O valor previsto para o nível da tremonha 10 instantes de tempo à frente corresponde ao nível atual mais a variação do nível, determinada pelo modelo.

Obtivemos os seguintes resultados para a previsão do nível da tremonha 10 instantes de tempo à frente:

Tabela 2. Quadro comparativo da previsão do nível da tremonha.

Quadro Comparativo da Previsão do Nível da Tremonha		
	Erro do Modelo Naive	Erro do Modelo Neuro-Fuzzy
Nível da tremonha (dados de validação)	28.4465	9.9289

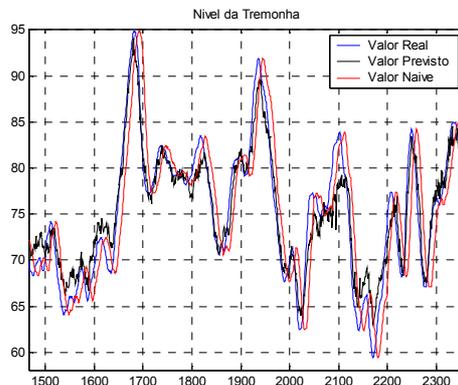


Figura 4. Nível real, nível previsto pelo modelo neuro-fuzzy e nível previsto pelo modelo Naive, previsão para 10 instantes de tempo à frente.

Conforme verificamos nos gráficos acima, a previsão do nível pelo modelo neuro-fuzzy obtido mostrou-se melhor do que a previsão do modelo Naive, e também mostrou-se satisfatória em relação à dinâmica real do processo.

Para comparação da resposta do controlador PI tradicional e PI preditivo, foram realizadas simulação da dinâmica da planta para cada controle. Para simulação da dinâmica da planta, foi realizada uma alteração de setpoint de 80% para 50%. O processo controlado pelo controlador PI tradicional apresentou resposta oscilatória e

overshoot em torno de 30%. O controle PI preditivo apresentou resposta estável e overshoot de 5%, conforme apresentado abaixo.

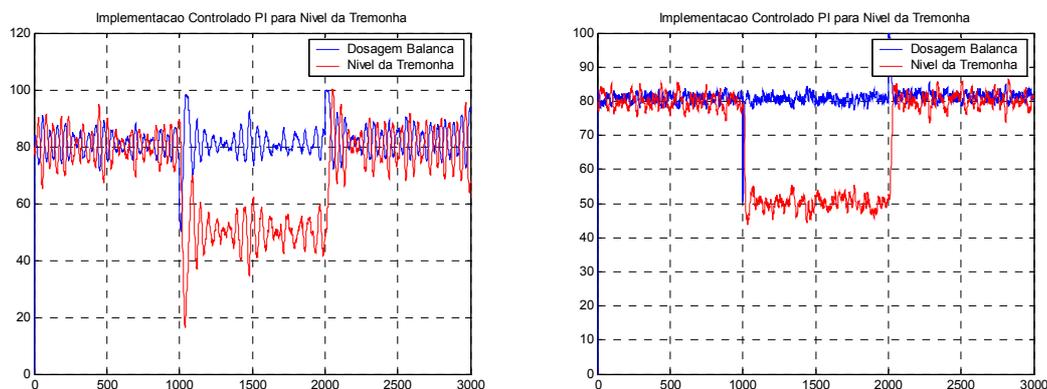


Figura 5. Dinâmica do sistema controlado por um controlador PI tradicional e PI preditivo.

3.2 Projeto do Modelo da Variação do Nível da Tremonha Utilizando Técnicas de Rede Neural Artificial

Foram utilizadas algumas arquiteturas de rede neural artificial para projeto do controlador preditivo.

Abaixo é apresentada uma tabela comparativa entres os preditores projetados, os resultados foram obtidos em simulações realizadas com dados reais.

Tabela 3. Quadro comparativo das redes neurais artificiais treinadas.

Quadro Comparativo das RNAs Treinadas					
Topologia	Neurônios			Erro	Épocas de Treinamento
	Entrada	Camada Escondida	Saída		
Naive	--	--	--	25,404	--
Adaline	--	--	--	6,850	100
RPROP	4	3	1	6,100	600
RPROP	4	4	1	6,650	600
Gradient descent	4	3	1	22,480	1000
Gradient descent	4	4	1	23,400	1000
Quasi-Newton	4	3	1	4,960	218
Quasi-Newton	4	4	1	4,950	313
Levenberg-Marquardt	4	3	1	5,400	1000
Levenberg-Marquardt	4	4	1	5,410	1000

O preditor Adaline foi implantado no sistema de controle da máquina de sinter, devido à facilidade da sua implementação no sistema de controle PLC e à proximidade do valor de erro encontrado em simulação aos erros das arquiteturas de melhor desempenho e maior complexidade – redes MLP.

Inicialmente, o preditor Adaline foi implantado para validação sem interagir com o controle do processo. Alguns resultados da predição do nível da tremonha da Máquina de Sinter são apresentados nos gráficos de tendência abaixo. A saída do

preditor Adaline está representada por uma linha bege, enquanto o nível real da tremonha está representado por uma linha preta.

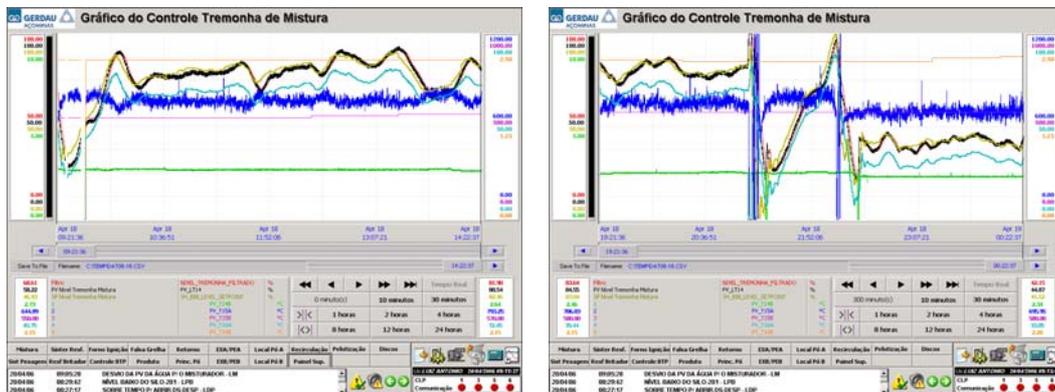


Figura 6. Gráficos de tendência mostrando a saída do preditor Adaline (bege) e nível real da tremonha de alimentação (preto) – resultado obtido durante a validação no processo real.

O passo seguinte foi implementar o controle preditivo do nível da tremonha de alimentação da máquina de sinter. A partir deste momento, o controlador PI+FeedForward existente passou a receber como medição de nível a saída do preditor Adaline, e não mais o nível atual da tremonha. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, superando o controle tradicional que se encontrava implantado. A seguir são apresentadas respostas dos dois sistemas.

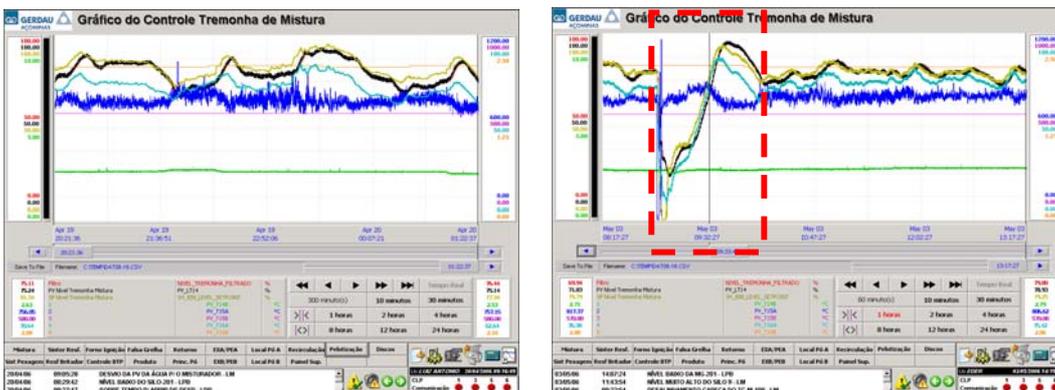


Figura 7. Gráfico de tendência do nível da tremonha, controlado por um controlador convencional e controlador preditivo.

Pode-se observar no gráfico de tendência acima que o controle preditivo é eficiente, tanto mantendo estabilizado o nível da tremonha, quanto respondendo de maneira adequada às diversas condições operacionais.

Na região acima, destacada por uma caixa vermelha, observa-se uma condição operacional característica de parada e retorno da Máquina de Sinter. A redução drástica do nível da tremonha, provavelmente devido à falta de alimentação da mesma, causou a parada da Máquina de Sinter por nível baixo. No retorno da máquina de sinter, o nível da tremonha tende a subir rapidamente devido à baixa velocidade da máquina de sinter. Esta é uma condição crítica, pois pode causar nova parada da alimentação da tremonha por nível alto. Está claro que o preditor previu ambas as condições de parada, da máquina de sinter e da alimentação da tremonha. O controlador preditivo tomou ações corretivas, evitando a interrupção da alimentação da tremonha de alimentação da máquina de sinter por nível alto.

4 CONCLUSÃO

É desejável à operação da Máquina de Sinter, manter o nível da tremonha de alimentação o mais elevado possível. Quanto maior o nível, menor é a altura de queda da pelota de mistura durante a alimentação da tremonha (o que pode causar a quebra da pelota), e maior será o estoque de material disponível no caso de falta de alimentação da tremonha.

A alimentação da máquina de sinter para por segurança na ocorrência de alarme de nível muito alto HH, ou por nível muito baixo LL. Estas paradas impõem descontinuidade operacional, prejudicando o ritmo de produção de sinter.

Atualmente a tremonha de alimentação da Máquina de Sinter opera com um set-point de nível igual a 80%. O alarme por nível muito alto ocorre com 98% e o de nível muito baixo com 20% do nível total da tremonha.

Por meio de análise histórica da operação da Máquina de Sinter, verificou-se para o controle PI+FeedForward tradicional um desvio padrão do nível igual a 5,5%. Temos assim uma margem de segurança igual a 3,27 desvios padrões entre o set-point do nível e o alarme por nível muito alto.

Após implantação do controlador PI+FeedForward preditivo, o desvio padrão do nível reduziu para 3,9%. Com este novo resultado, e mantendo a mesma margem de segurança de 3,27 desvios padrões entre o set-point e o alarme por nível muito alto, pode-se elevar o set-point de nível para 85,24%.

Considerando a alteração do set-point de nível para 85,24%, o material disponível na tremonha de alimentação da máquina de sinter aumenta em 8,7%.

Tem-se com ganho direto a redução da variabilidade do nível da tremonha de alimentação da Máquina de Sinter com conseqüente aumento da continuidade operacional do processo e aumento do produto disponível na tremonha. Além dos ganhos apresentados acima, a elevação do nível da tremonha contribui na preservação da qualidade da matéria-prima.