

Detecção e Diagnóstico de Falhas em Um Alto-Forno Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional.

ROBERCY A. SILVA¹, WALMIR M. CAMINHAS²

¹Belgo Mineira - Usina Monlevade – João Monlevade – MG, BRASIL

²CPDEE, Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizontes – MG, BRASIL
E-maisl :robercy.alves@belgo.com.br, caminhas@eee.ufmg.br

Abstract

This short paper describes a system to detect and diagnose scaffold presence in Blast furnaces. Using computing intelligence techniques, this system will be used to detect the scaffold formation, alarming and showing the scaffold probably position and her thickness. This system is based on a modified ANFIS network.

1 - Introdução

Neste trabalho a detecção e diagnóstico de falhas será abordada sob a ótica de classificação de padrões. Os padrões a serem considerados serão formados a partir das informações de entrada e saída da planta. O sistema de classificação será constituído por uma variação feita em cima da topologia ANFIS, que será treinada com dados da planta, para indicar a presença ou não de cascão. Como o sistema só utilizará informações de entrada e saída, não será necessário o desenvolvimento de seu modelo matemático do Sistema.

Para validar o sistema, ele será inicializado com os parâmetros obtidos durante a fase de treinamento, e utilizará os dados de entrada e saída que serão obtidos em tempo real do Alto-forno A da Usina Monlevade da Belgo.

As próximas seções detalham o problema e as ferramentas utilizadas. A Seção 2 dará uma breve explicação do que é um Alto-forno, dos motivos que levam à formação do cascão e dos problemas causados por ele. A Seção 3 apresentará a metodologia e as ferramentas que serão usadas para a detecção e diagnóstico do cascão. Os resultados obtidos por este Sistema de detecção e diagnósticos serão exibidos na Seção 4.

2 - O Alto-forno

O alto-forno (Figura 1) é um equipamento usado pela Indústria siderúrgica para fazer a redução do minério de ferro, transformando-o em gusa, que é um estágio intermediário antes de se transformar em aço.

2.1 Seu funcionamento

Seu princípio de funcionamento consiste em um grande volume de ar aquecido a 1000°, que sendo insuflado pelas ventaneiras (bocal por onde o ar quente é insuflado no interior do alto-forno), irá reagir com o coque, gerando o gás CO e calor, estabelecendo uma taxa de consumo de coque, e assim, o fluxo ascendente de gás (reductor) em alta temperatura irá trocar calor com a carga, determinando as isotermas no interior do alto-forno. Na região inferior do alto-forno, os gases à temperatura de 2000 °C irão fundir o ferro já reduzido e a escória, bem como aquecê-lo até as temperaturas de vazamento, que ocorrem entre 1500 °C e 1600 °C.

Estabelece-se então uma taxa de fusão, determinando um ritmo de alimentação de carga, criando um fluxo descendente de materiais sólidos.

Assim estando em contato um gás reductor com o minério de ferro oxidando tem-se o processo de redução do minério.

Os materiais espúrios, presentes nos minérios, não serão reduzidos, sendo apenas fundidos, e sairão do alto-forno através da escória.

De uma maneira mais detalhada, poderíamos dizer que existem dois processos que caracterizam o funcionamento de um alto-forno: o processo físico e o processo químico.

2.2 Processo físico

Os gases produzidos pela combustão do carbono do coque sobem no alto-forno, saindo pelo topo. O espaço criado por essa combustão e pela fusão do material da carga é continuamente ocupado pelo material que desce na coluna de carga. Portanto existem duas correntes em

direções opostas. É possível distinguir quatro regiões dentro do alto-forno de acordo com o comportamento físico dos materiais (Figura 1).

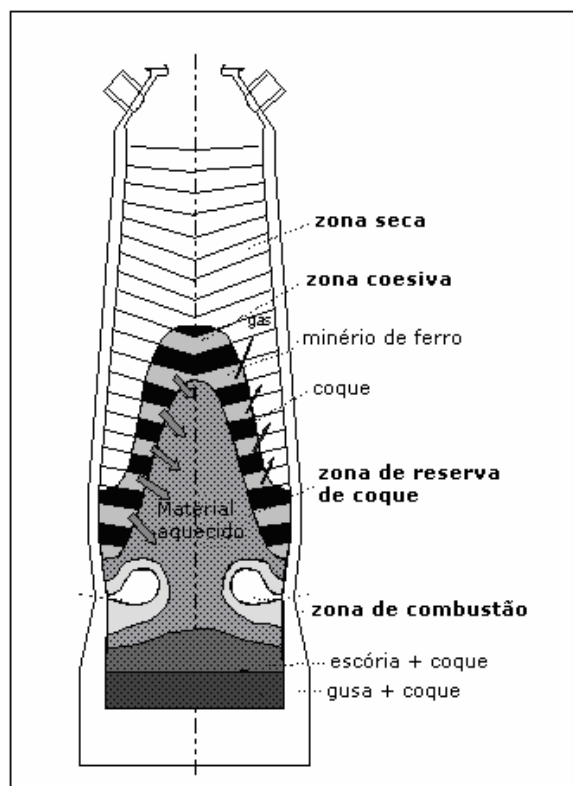


Figura 1. Regiões de processamento de um alto-forno.

2.3 Processo químico

O processo químico pode ser verificado através do balanço de massas (Tabela 1), que é a indicação das substanciais que entram e saem do alto-forno.

Tabela 1. Balanço de massas típico de um Alto-forno.

	Entrada	Saída
Topo	Através do carregamento - sinter (59,5% Fé) - pellets (66% Fé) - coque (89% C) - fundentes (sílica)	Através do sistema de limpeza de gases - gás - poeira - sinter - coque - fundentes
Base	Através das ventaneiras - sopro ($N_2 + O_2 + H_2O$) - carvão pulverizado + N_2 - vapor - oxigênio	Através do furo de gusa - gusa - escória

2.4 O cascão

O cascão nada mais que uma camada de material não processado ou de álcalis que adere à parede interna do alto-forno (Figura 2). Porém, se não for interrompido o

crescimento desta camada, ela poderá atingir proporções tais que a carga, em algumas partes ou em toda a seção do forno, para de descer normalmente, caracterizando o engaiolamento (obstrução interna, que impede a descida normal da carga dentro do alto-forno) do alto-forno. A permeabilidade da carga cai, e em alguns lugares chega a zero. Isto causa um considerável aumento da pressão na frente das ventaneiras (em alguns casos atinge até o máximo da pressão permitida no soprador). O forno então não aceita mais sopro. A descida de carga continua lenta na região engaiolada e forma um vazio na região logo abaixo, o que torna a situação perigosa. Quanto mais engaiolada estiver a carga, maior o perigo de um colapso na sustentação desta com riscos para o forno. Uma outra consequência da presença de cascão dentro do alto-forno é quando este cascão é de tamanho avantajado, e se solta de repente, causando a quebra das ventaneiras, e mesmo acidentes envolvendo os operadores da área de corrida.



Figura 2. Detalhe de uma camada de cascão do Alto-forno 5 da Belgo – Usina Monlevade (foto tirada em 2001, durante desativação do Alto-forno 5 da Belgo)

Se o cascão não for removido a tempo, corre o risco dele incrustar dentro do alto-forno, de tal maneira, que será preciso uma parada total do alto-forno, para sua remoção, o que não é desejável por afetar a produção de gusa da planta. A duração de uma parada para retirar o cascão incrustado nas paredes de um alto-forno, leva em média 12 dias! Que é o tempo necessário para esfriar o forno, permitindo a entrada de trabalhadores e máquinas (Figura 3), e o posterior reaquecimento do equipamento. Deste tempo, 80 horas são alocadas somente para remoção do cascão, que pode ser feito por máquinas escavadoras, ou até mesmo, dinamite.

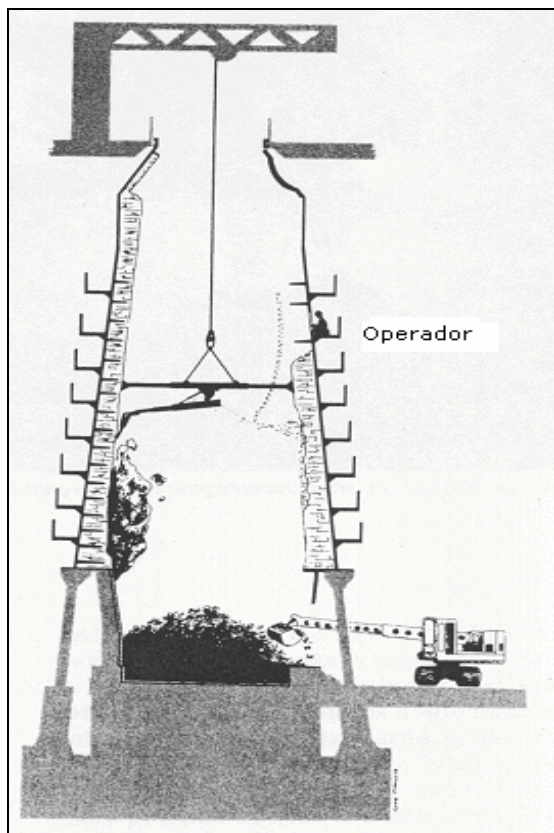


Figura 3. Trabalho de remoção de cascão com o uso de escavadeiras.

3 - Sistema de detecção e diagnóstico

A proposta deste trabalho é a de desenvolver um sistema baseado em técnicas de inteligência computacional, para detectar e diagnosticar a presença e evolução da camada de cascão que está sendo desenvolvida dentro do alto-forno, pois é sabido, ser necessária a presença de uma pequena camada deste cascão, para proteger os *staves* (peça similar a um trocador de calor, que isola a parte interna da parte externa de alguns tipos de alto-fornos). O diagrama de blocos deste sistema de detecção e diagnóstico de falhas pode ser visto na figura 4. A partir dos sinais u (entrada); y (saída) e y^* (referência) do sistema, é feita a classificação da condição da planta. Os vetores f e d representam as falhas e distúrbios, respectivamente.

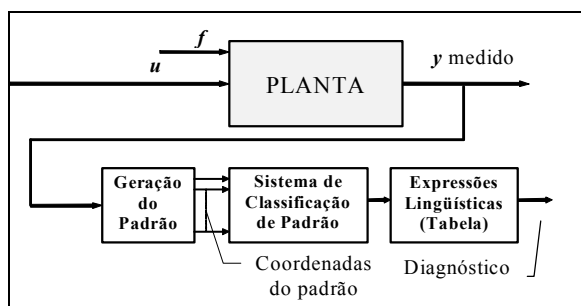


Figura 4. Diagrama em blocos do Sistema.

3.1 A identificação do cascão

A identificação da formação do cascão, se dá principalmente pela observação dos seguintes itens:

- Baixa produção, tendência a engaiolar;
- Maior geração de pó no coletor de poeira;
- Redução da perda térmica;
- Alto rendimento do Alto-forno.

É sabido que a formação do cascão altera a perda térmica do Alto-forno, como pode ser visto no gráfico anexo (Figura 5), onde se tem a variação da perda térmica durante um período de 20 dias de operação de um alto-forno. Desta maneira, nosso sistema de detecção irá utilizar esta informação de perdas térmicas para detecção e diagnóstico da presença e periculosidade do cascão.

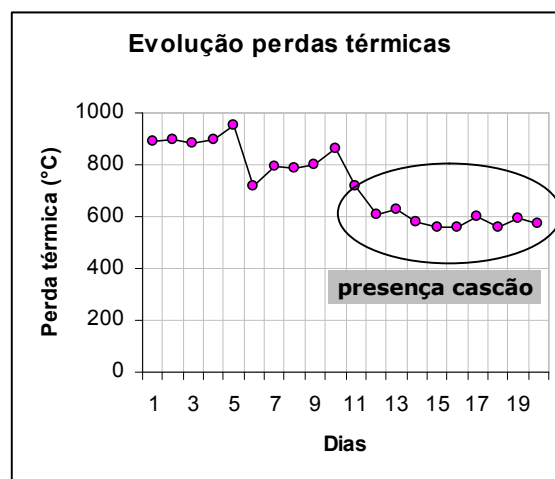


Figura 5. Gráfico de evolução das perdas térmicas durante a formação do cascão.

3.2 Modelagem do sistema de detecção

O Sistema de detecção de formação de cascão será composto de duas partes:

1. Modelo tridimensional do Alto-forno, que permitirá a visualização da distribuição de temperatura dos staves em toda a superfície do Alto-forno, facilitando a localização do ponto a ser trabalhado pelo operador. Na realidade, este sistema servirá como um indicador visual da espessura da camada do cascão, orientando ao operador em suas decisões relativas à distribuição de carga ou de alteração operacional do alto-forno.
2. Modelagem do sistema que irá fazer a detecção on-line do cascão e de sua evolução. Este sistema irá gerar um alarme para o operador, que por sua vez, poderá visualizar no modelo tridimensional do Alto-forno, a exata localização do ponto de formação do cascão. Serão utilizadas as técnicas de Inteligência computacional para tratamento dos dados relativos as

perdas térmicas, e desta maneira, fazer a detecção e diagnóstico do cascão. Será utilizada uma estrutura ANFIS modificada para diagnóstico é detecção. Esta estrutura será detalhada no próximo tópico.

Para acompanhamento da evolução do cascão, será usado o acompanhamento das perdas térmicas, que será calculado a partir das medidas das temperaturas dos staves. A partir da avaliação das perdas térmicas, poderemos estimar a espessura da camada de cascão, pois quanto mais espessa for esta camada, menor será a temperatura no stave (menor perda térmica – menor troca de calor do Alto-forno com o stave), haja visto que a camada de cascão funcionará como um isolante térmico, e quanto menor a camada de cascão, mais quente estará o stave (maior perda térmica – maior troca de calor do interior do Alto-forno com o stave).

3.3 A rede ANFIS

O modelo ANFIS (*Adaptive Neuro-based Fuzzy Inference System*) foi desenvolvido por J.R. Jang em 1993, e é funcionalmente equivalente aos sistemas de inferência nebuloso, inicialmente proposto por Takagi e Sugeno. A capacidade adaptativa da rede ANFIS permite que ela tenha aplicações em varias áreas, como, por exemplo, controle adaptativo, processamento e tratamento de sinais, classificação de dados e extração de caracteres a partir de exemplos. Uma propriedade interessante deste modelo é que um conjunto de parâmetros pode ser decomposto para utilizar uma regra de aprendizagem híbrida mais eficiente que os mecanismos tradicionais.

A deficiência do modelo ANFIS convencional (Figura 7) está no fato de que a geração de regras se da pela enumeração de todas as possíveis combinações da função de pertinência de todas as entradas. Por exemplo, para um sistema de inferência Nebuloso com 10 entradas, cada qual com 2 funções de pertinência, teríamos $1024 (=2^{10})$ regras possíveis, o que seria algo exagerado para qualquer algoritmo de aprendizado.

A proposta atual, é substituir as camadas 1,2 e 3 da rede ANFIS original, por uma camada de neurônios, objetivando com isto, reduzir a complexidade computacional característica da rede ANFIS, em situações em que é necessário se trabalhar com uma quantidade elevada de entradas e regras.

Um esboço da topologia ANFIS modificada proposta, pode ser vista na Figura 8. Pode se ver claramente as diferenças nas camadas 1,2 e 3 em relação ao modelo ANFIS convencional, que pode ser visto na Figura 7. A saída deste modelo e dada por :

Nesta topologia ANFIS modificada, será usada uma regra de aprendizado híbrida, a proposta será a de usar o *backpropagation* e o método dos mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros do modelo.

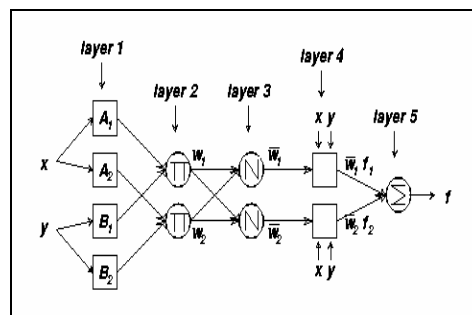


Figura 7. Rede ANFIS convencional.

No sentido forward do algoritmo híbrido de aprendizagem, os sinais de entrada vão até a camada 4 onde os parâmetros consequentes serão calculados pelo método dos mínimos quadrados. No sentido *backward*, o erro propaga para trás, e as premissas são atualizadas pelo algoritmo *backpropagation*.

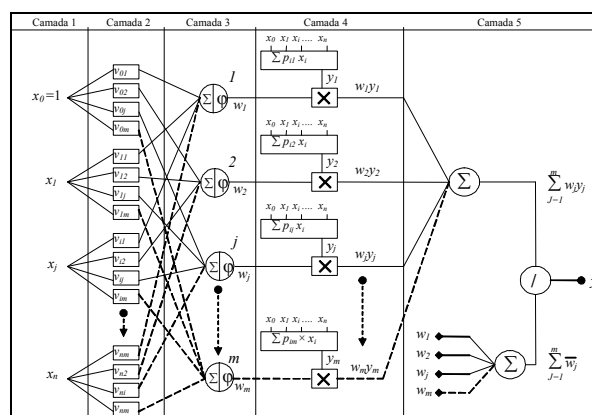


Figura 8. Estrutura da rede ANFIS proposta.

Na tabela 2, estão sumarizadas as atividades envolvidas em cada passagem do algoritmo híbrido de treinamento desta rede ANFIS.

Tabela 2. Ações executadas pela rede ANFIS proposta.

	Sentido <i>Forward</i>	Sentido <i>Backward</i>
Pesos da 1ª camada (v_{ij})	Fixos	<i>Backpropagation</i>
Parâmetros lineares (p_{ij})	Mínimos quadrados	Fixo

Esta alteração na topologia inicial da rede ANFIS convencional tem como objetivo principal, superar as limitações impostas por este tipo de rede, que é a dificuldade de se trabalhar com um sistema que apresente muitas entradas. Isto, como já foi discutido, e devido à característica da rede ANFIS convencional, que é a de gerar regras para todas as combinações possíveis das funções de pertinência de cada entrada. Isto nos leva a uma explosão exponencial, quando estamos trabalhando com um numero elevado de entra-

das. Por exemplo, para um sistema nebuloso com 10 entradas, e cada uma das entradas com 2 funções de pertinência, teríamos 1024 ($=2^{10}$) regras, o que pode ser considerado exagerado para qualquer método de aprendizado.

Nesta topologia ANFIS utilizada, as mesmas 10 entradas nos levariam a trabalhar com apenas 100 ($=10^2$) pesos! O que de imediato, nos proporciona um menor esforço computacional, além de acelerar a convergência de nosso modelo. Durante os testes do modelo ANFIS com perceptrons na entrada, verificamos que nos problemas de alta dimensionalidade, ele se saiu muito melhor que o modelo ANFIS convencional.

3.4 Implementação do Sistema de detecção

O sistema de detecção e diagnóstico foi desenvolvido usando os recursos do MATLAB e da linguagem de programação Delphi, e foi desenvolvido conforme o diagrama da figura 9.

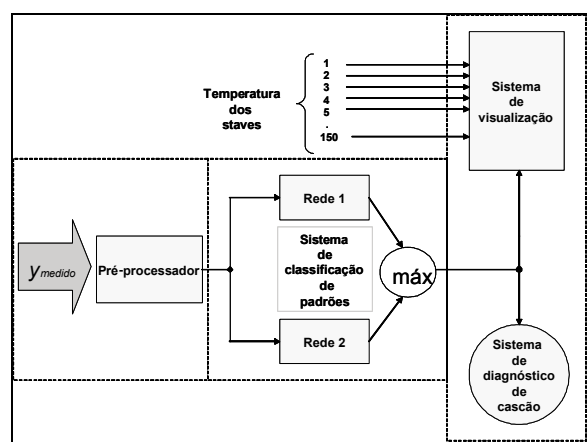


Figura 9. Estrutura do sistema de detecção de cascão.

O sistema é formado pelos seguintes módulos:

- Módulo pré-processador : Responsável pela leitura, a cada 60 segundos, das informações de perda térmica e temperatura dos *staves* do Alto-forno, e de fazer a validação dos dados.
- Módulo de classificação de padrões : Neste módulo, serão usadas duas redes. A rede 1 será treinada para indicar a presença de cascão e a rede 2 será treinada para indicar a ausência de cascão. A saída da rede 1 indicará o grau de pertinência à presença de cascão, e a saída da rede 2 o grau de pertinência à ausência de cascão, desta maneira, se tivermos a certeza que existe um cascão dentro do alto-forno, deveremos obter um valor próximo a um na saída da rede 1 e próxima a zero na saída da rede 2. As saídas das redes serão normalizadas, e o diagnóstico será feito a partir da comparação destas duas saídas. A rede que tiver o maior valor, será a rede vencedora, e portanto, será a responsável pelo diagnóstico (Figura 10).

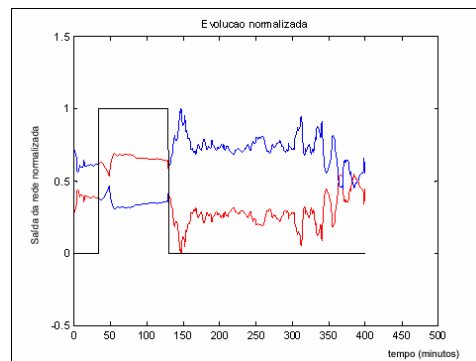


Figura 10. Saída da rede (com e sem cascão) x Valor real.

- Módulo de diagnóstico de cascão e visualização : Este é o módulo para interface homem-máquina, ele indica a presença, gravidade e a localização da camada de cascão. Este módulo fornece uma visão radial (Figura 11) e outra tridimensional (Figura 12) do Alto-forno, permitindo uma clara identificação da posição e do perfil da camada de cascão. Na visão radial, é possível ver a espessura aproximada da camada de cascão, que será calculada a partir da medida de temperatura dos *staves*.

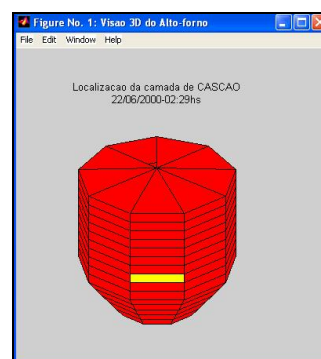


Figura 11. Tela de visualização tridimensional do alto-forno.

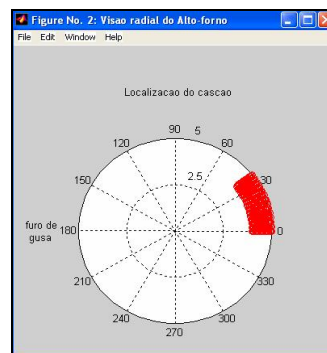


Figura 12. Tela de visualização radial, para a indicação da localização e espessura do cascão.

4 - Resultados

O treinamento da rede ANFIS foi feito com dados reais do processo que foram armazenados desde o início de operação do alto-forno A da Belgo – Usina de Monlevade, e com as informações contidas nos relatórios de operação. A topologia proposta é composta por uma rede ANFIS de 4 entradas (perdas térmicas por quadrante do alto-forno), com 15 neurônios. Após o treinamento da rede com uma base de dados de 12000 medidas de perdas térmicas, o modelo desenvolvido atingiu o índice de acerto de 96% (Figura 13).

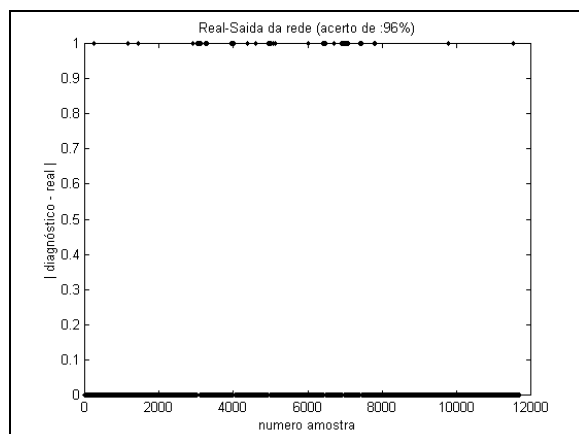


Figura 13. Gráfico indicando a diferença entre o diagnóstico do modelo e a real ocorrência do cascão.

Com os parâmetros obtidos durante a etapa de treinamento, colocamos o sistema em funcionamento com dados reais. Este sistema de detecção e diagnóstico de cascão está rodando desde 26 de dezembro de 2002, obtendo 100% de acerto na detecção de cascão, o que pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos pelo Sistema.

Data	Indicação Sistema	Situação Real
28 Feb 2002	Sim	Cascão
21 Mar 2002	Sim	Cascão
24 Mar 2002	Sim	Cascão
26 Mar 2002	Sim	Cascão
08 Abr 2002	Sim	Cascão
10 Abr 2002	Sim	Cascão
25 Abr 2002	Sim	Cascão

Com o diagnóstico antecipado da formação de cascão, será possível atuar no forno, a tempo de evitar maiores prejuízos, o que permitiria uma economia de US\$ 500.000 (valor referência ano 2000) devido a lucro cessante e reparo de ventaneiras, além de evitar graves acidentes de trabalho.

5 - Conclusões

Apesar de ainda não estar totalmente disponível para o uso da operação do Alto-forno, o sistema já se mostrou de grande utilidade, pois já detectou duas condições reais de Cascão no Alto-forno, possibilitando a atuação corretiva imediata por parte dos operadores do Alto-forno.

O sistema se mostrou bastante viável, e em breve, será criada uma versão totalmente em Delphi, para ser instalado na cabine de operação do Alto-forno. Está sendo estudado também, o desenvolvimento de um módulo de interface com o Sistema de controle, para que as decisões e ações sejam tomadas pelo próprio sistema de detecção e diagnóstico.

6 - Agradecimentos

Belgo – Usina Monlevade, e ao CNPq.

Referências

- [1] Apostila de curso de operação de Alto-forno da Belgo Mineira, Usina Monlevade, MG, Brasil.
- [2] Braga, Antônio P. (2000). Redes Neurais Artificiais – Teoria e aplicações, Editora LTC.
- [3] Braga, Raimundo N.B. (1990). Aspectos Tecnológicos relativos à preparação de cargas e operação de alto-forno, ABM.
- [4] Caminhas, Waldir M. (1997). Estratégias de Detecção e Diagnósticos de Falhas em Sistemas Dinâmicos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- [5] J.-S. R. Jang. (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice Hall inc.
- [6] Patton, Paul F.R., Clark, Robert. (1989). Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Prentice Hall, Hertfortshire, 4RG.
- [7] Relatórios de operação do Alto-forno A da Belgo Mineira, Usina Monlevade