

DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE LÍQUIDOS NO CADINHO DO ALTO-FORNO #3 DA CSN ATRAVÉS DE SENSORES E MODELO NEURAL¹

Aline Aguiar Lopes²

Flavio Lopes Machado³

Sebastião Jorge Xavier Noblat³

Moacir Alves dos Reis⁴

Fernando Tadeu Pereira de Medeiros⁵

Resumo

Devido às condições severas que prevalecem no alto-forno existe uma dificuldade de previsão dos fenômenos que ocorrem em seu interior, sendo o conhecimento desses fenômenos de extrema importância para tomadas de decisões no processo de alto-forno. O cadinho, região que, em muitos casos, define a vida útil do alto-forno, é onde ocorre o acúmulo e escoamento de gusa e escória, fenômeno que tem importante função na operação do forno. Em função das dificuldades de se realizar medições que permitam o conhecimento do estado fluidodinâmico do alto-forno, principalmente no cadinho, alguns métodos têm sido desenvolvidos na busca desse objetivo. No desenvolvimento do presente trabalho foi aplicado o método de medição de força eletromotriz (FEM) à prática operacional do Alto-Forno 3 da CSN, sendo desenvolvido uma rede neural artificial para o tratamento dos dados na busca de uma monitoração contínua do nível de líquidos e uma visão instantânea das condições internas do cadinho. Os resultados obtidos com a aplicação do modelo foram coerentes com as condições operacionais do alto-forno, representando de forma eficaz o regime de escoamento e demonstrando a eficiência e o potencial da utilização do modelo como ferramenta operacional de processo.

Palavras-chave: Siderurgia; Alto-forno; Cadinho; Redes neurais artificiais.

LEVEL OF LIQUIDS DETERMINATION AT CSN NUMBER 3 BLAST FURNACE HEARTH BY SENSORING AND A NEURAL MODELLING

Abstract

Due to the severe conditions prevailing in the blast furnaces, there is certain difficulty in foreseeing phenomena that occur in its interior, being the knowledge of those phenomena of extreme importance to process decision making. The hearth, region that, in many cases, defines the lifetime of a furnace, where accumulation and flow metal and slag, phenomenon of important function in the blast furnace operation. In consequence of the difficulties to perform measurements to monitor the internal status of the furnace, especially the heart, some methods have been developed aiming at this task. In developing the present work a method to measure the electric driving force was applied to the operation at CSN Blast Furnace number 3, being also developed a artificial neural network to data treating to monitor the liquid level and having a instant vision of the internal hearth conditions. The results obtained with such a application were coherent and efficient, demonstrating its efficiency and potential as a process operational tool.

Key words: Ironmaking; Blast furnace; Hearth; Artificial neural networks.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Formanda do Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense.

³ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro Especialista da Companhia Siderúrgica Nacional

⁴ Engenheiro Eletrônico, Engenheiro de Desenvolvimento, Companhia Siderúrgica Nacional.

⁵ Professor Associado, Universidade Federal Fluminense

1 INTRODUÇÃO

Num processo siderúrgico, é primordial o bom funcionamento do alto-forno, o qual interfere diretamente na qualidade do ferro-gusa, seu produto primário, fornecido para as etapas seguintes na produção do aço. Pode-se dizer que o bom funcionamento do alto-forno está intimamente ligado ao seu monitoramento e ao entendimento destes dados coletados, o que auxilia na tomada de decisões operacionais, para a produção de ferro gusa, para a segurança na operação do alto-forno, bem como em ações para aumentar a vida útil do equipamento.

Nesse sentido, as práticas de casa de corridas têm influência significativa, pois estão interligadas com o processo de forma a garantir um bom escoamento e drenagem dos líquidos no cadinho, o que confere estabilidade operacional ao alto-forno. Isso se deve ao fato de que, o acúmulo de líquidos no cadinho reduz o espaço livre nas zonas superiores do cadinho para o gás produzido pelo processo, gerando um aumento da pressão interna do alto-forno afetando assim a descida de carga, daí a necessidade do cadinho estar sempre bem escoado.

O controle operacional do alto-forno não possui uma ferramenta para determinar o momento adequado para iniciar uma corrida, sendo geralmente utilizado o intervalo de tempo estabelecido de forma empírica, assim como para o fim da corrida, que só é feito no momento em que se inicia o sopro de gás através do furo de gusa. Esse método não atende completamente a operação de casa de corridas, pois em situações com variação na viscosidade da escória ou perda de nível térmico, ocorre uma alteração da fluidez principalmente da escória, provocando um sopro de gás falso, dificultando o controle do escoamento dos líquidos.

Assim, na busca de fornecer melhores ferramentas de controle, foi desenvolvido no presente trabalho a formulação e parametrização de um modelo neural para o monitoramento contínuo do nível de líquidos no cadinho do alto-forno em paralelo às medições de nível de líquidos a partir da FEM. Esse modelo pode ser uma ferramenta de grande auxílio aos operadores de alto-fornos na determinação do melhor momento para realizar a corrida de gusa e para prever problemas de permeabilidade de cadinho, resultando em operação mais segura e produtiva.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Medição da Força Eletromotriz (FEM)

A medição da força eletromotriz com dois eletrodos sobre a carcaça de aço, colocados em diferentes alturas na área do cadinho, tem sido mencionada por alguns autores. O mecanismo de geração da FEM ainda não é muito bem entendido, acredita-se que a diferença de potencial elétrico é originada pelas reações químicas no cadinho e na área da ventaneira, gerando um circuito que envolve a escória, o gusa, da cama de coque e da carcaça do forno.

Danloy et al.⁽¹⁾ usaram o valor de pico da FEM como um indicador de risco para o nível muito alto do líquido e um valor mínimo como um indicador para a quantidade de líquido retida no cadinho. Ainda indicaram a localização desses dois eletrodos, isto é, um eletrodo está acima do nível das ventaneiras e o outro abaixo do nível do furo de corrida. Dorofeev e Novokhatskii⁽²⁾ propuseram a fixação de um sensor no final da região da rampa e o outro na região da soleira.

No presente projeto a FEM foi medida através da diferença do potencial elétrico em diferentes posições de medição na carcaça do alto-forno. O equipamento de

monitoração do cadinho foi instalado durante uma parada para manutenção preventiva do Alto-Forno #3 da CSN em novembro de 2008. Foram instalados quatro conjuntos de medição da FEM nas posições 0°, 90°, 180° e 270°, entre os furos de gusa. Cada conjunto é constituído de um par de cabos de aço fixados através de um eletrodo soldado (parafuso) na carcaça do alto-forno, sendo o superior acima do nível das ventaneiras e o inferior na região da soleira do cadinho, mantendo o alinhamento dos mesmos. A diferença dos potenciais elétricos na carcaça do alto-forno é resultante das quedas de tensão resultante de todas as fontes de forças eletromotrizes.

Cada par de cabos foi ligado a um transmissor de mV/mA onde são recebidos o sinal da FEM e disponibiliza uma saída (4 mA a 20 mA), transmitindo a diferença de potencial elétrico de cada sensor para o PLC. Os valores medidos (mA) foram convertidos em porcentagem e plotados em função do tempo (segundos), criando um gráfico de tendência com as curvas dos quatro conjuntos. A medição é online e o registro de leitura foi ajustado para 10s. A Figura 1 apresenta a vista lateral com a sequência montada.

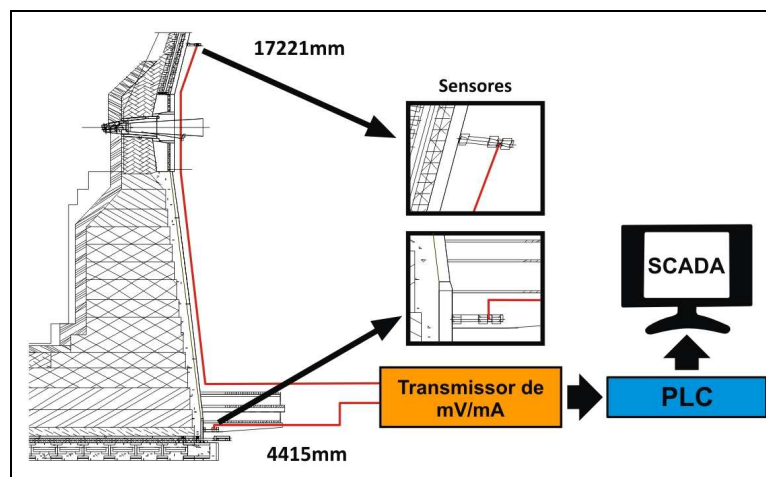


Figura 1: Disposição dos sensores.

Após a montagem e interligação do sistema de monitoração do nível de líquidos no cadinho do AF#3, o gráfico de tendência foi disponibilizado em uma tela gráfica no sistema supervisório.

Inicialmente, a amplitude configurada no transmissor foi de $-2,0$ mV a $+2,0$ mV, porém devido a FEM gerada ser relativamente baixa, o gráfico de tendências não apresentava boa visualização. A medição foi então ajustada para a faixa de $-1,0$ mV a $+1,0$ mV. Porém, após algum tempo, devido a ocorrências de valores acima de $1,0$ mV em períodos de grande instabilidade operacional do Alto-Forno #3, houve a necessidade de um novo ajuste para 0 mV a $1,5$ mV, que forneceu boa visualização das curvas e atendeu as maiores variações medidas até o momento.

2.2 Correlação da FEM com outras Variáveis e Determinação das Faixas de Medição

Após observar interferências de algumas variáveis operacionais na medição da FEM, as de maior interferência, como pressão da base e temperatura do gusa, foram inseridas no gráfico de tendências para facilitar a identificação da correlação com os valores da FEM.

A condição do enchimento do cadinho foi classificada em determinadas faixas estabelecidas durante o período de observação em situações estáveis e em situações de instabilidade operacional, definindo três condições para o nível do cadinho: normal (20% a 45%), atenção (46% a 55%) e cheio (>56%). Foi desenvolvido um software que avalia os valores medidos on-line com as faixas estabelecidas e classifica a condição do cadinho, disponibilizando em uma tela gráfica. Na condição mais crítica, ou seja, cadinho cheio, acima dos valores ideais de trabalho, um alarme é registrado no Scada.

2.3 Interferências na Medição da FEM

Alguns fatores operacionais como, deslocamento de carga e parada do AF, apresentam influência na medição da FEM, segundo Dorofeev e Novokhatskii.⁽²⁾ Danloy et al.⁽¹⁾ afirmam a influência de outros fatores, tais como, pressão de sopro, permeabilidade da carga e temperatura do gusa. A indução eletromagnética causada por acionamento de motores dispostos próximos aos sensores da FEM também pode causar ruídos no sinal.

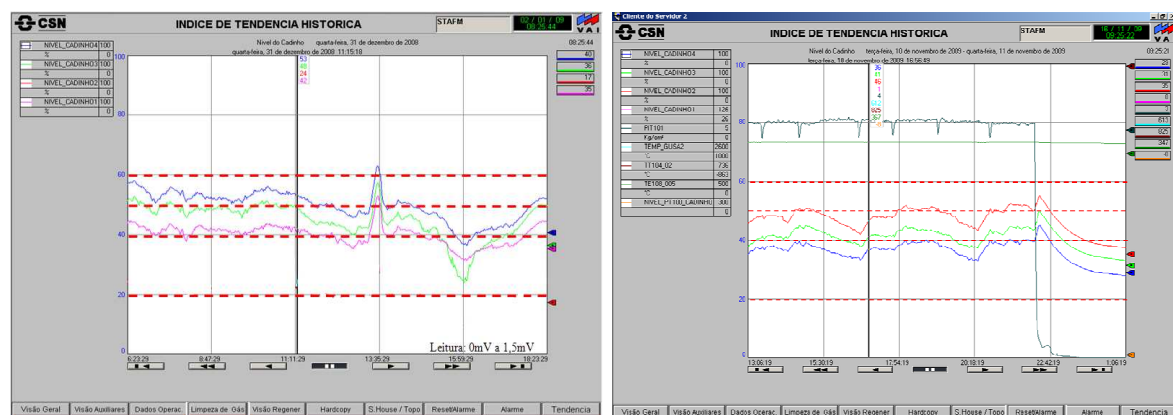
Verificamos algumas interferências citadas na literatura, sendo as principais: temperatura do gusa e pressão de sopro. Outras interferências foram percebidas como, ruídos de equipamentos, temperatura da parede e troca de furos de gusa.

2.3.1 Pressão de sopro

Em condições normais de operação, a pressão do sopro tende a ser estável, porém é diretamente afetada por vários parâmetros de processo. Verificou-se que durante reduções de pressão, como durante o procedimento de parada do alto-forno e paradas de emergência, os valores da FEM também reduziram e retornaram ao patamar normal com a estabilização do sopro.

Em paradas de emergência, onde o sopro foi reduzido bruscamente, nota-se um pico no gráfico da FEM (Figuras 2 e 3). Isso se deve ao fato de que, quando há uma rápida queda da pressão de sopro, ocorre uma acomodação da carga, e os líquidos que estavam gotejando pelas pedras de coque não encontram resistência do gás ascendente, podendo até mesmo entrar pelas ventaneiras.

Nas Figuras 2 e 3, observar-se que o nível de líquidos no cadinho, segundo a medição da FEM, mostrava-se bem alto, acima de 50%, devido a problemas de processo e escoamento, sendo o valor estabelecido como estável a faixa entre 20% e 40%. Durante uma redução de emergência o sopro foi retirado bruscamente, causando a entrada de escória nas ventaneiras, devido ao alto nível dos líquidos, e a parada de emergência do alto-forno para a troca das mesmas.



Figuras 2 e 3: Telas gráficas do nível de líquidos - Redução de sopro em emergência

A Figura 4 mostra uma redução brusca do sopro semelhante às anteriores. Porém é importante observar, que os valores da FEM estavam dentro da faixa de nível normal (20 e 40%), e mesmo com o pico gerado como nas situações anteriores, não houve a entrada de escória nas ventaneiras, confirmando que as faixas de controle estabelecidas são efetivas.

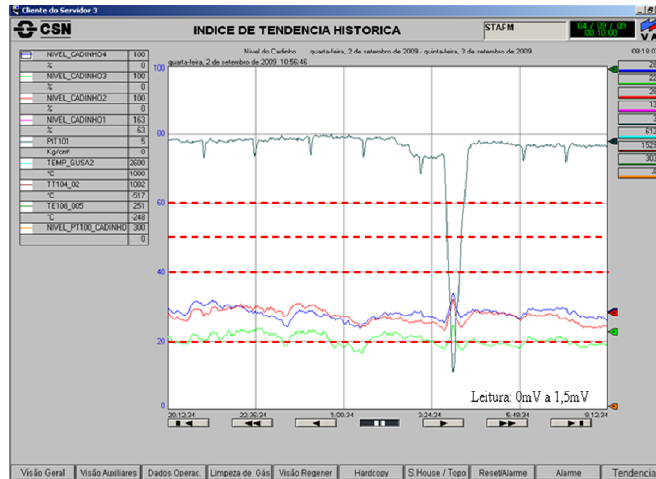
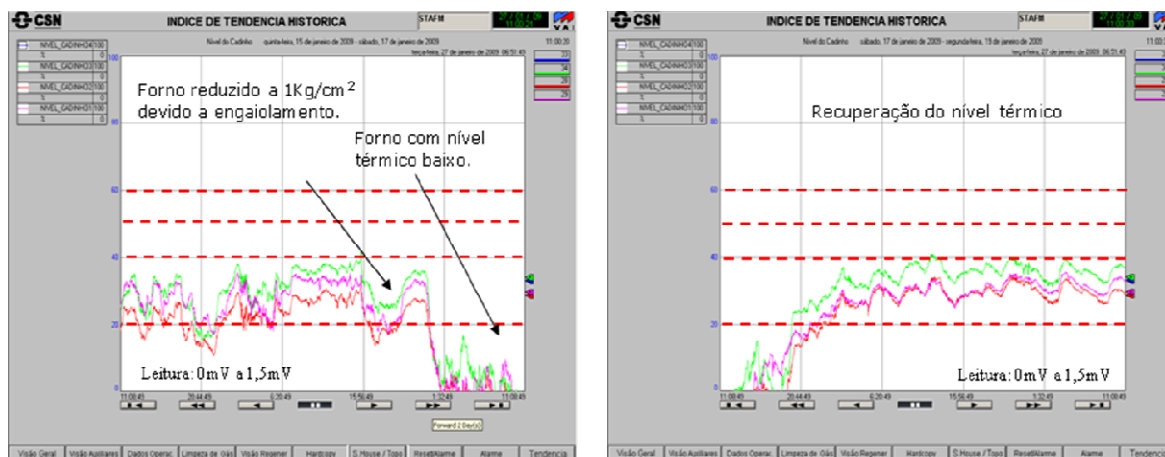


Figura 4: Tela gráfica do nível de líquidos – Redução do sopro em emergência.

2.3.2 Temperatura do gusa

Em condições normais a temperatura do gusa se mantém em torno de 1500°C ($\pm 20^\circ\text{C}$), porém em casos de instabilidade operacional que causem variações no nível térmico do alto-forno, a temperatura do gusa pode chegar a valores bem menores. As Figuras 5 e 6 se referem a um período em que o Alto-forno #3 apresentava vários problemas operacionais que levaram a uma forte perda térmica. Verificou-se nesse momento que a medição da FEM apresentou grande oscilação devido a variação da temperatura do gusa, conforme previsto por Danloy et al.⁽¹⁾ Através do levantamento do gráfico da FEM com a temperatura do gusa, foi confirmada a interferência na medição (Figura 7).



Figuras 5 e 6: Telas gráficas do nível de líquidos – Período com baixo nível térmico.

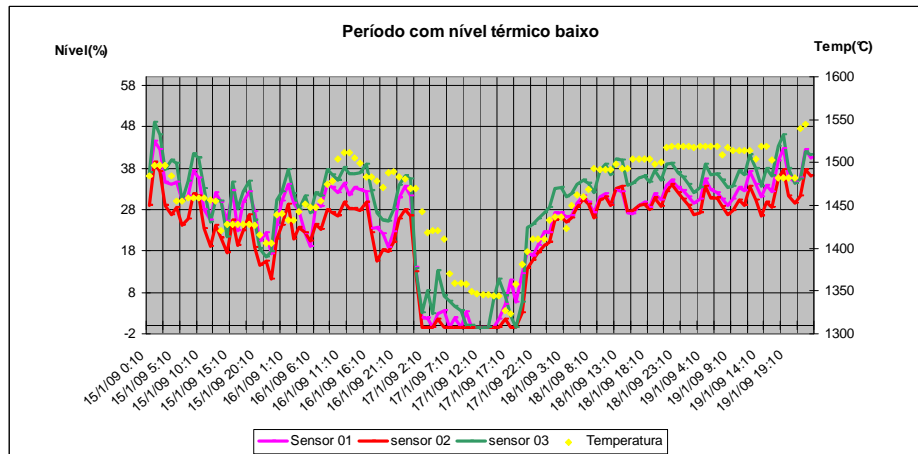


Figura 7: Variação do nível de líquidos com a temperatura em função do tempo.

2.4 Modelo de Redes Neurais Artificiais

Para a formulação do modelo foram selecionadas oito corridas dos meses de abril e maio de 2009. As corridas selecionadas foram as que apresentaram sopro na corrida anterior e na própria corrida para possibilitar a estimativa da massa de gusa e escória retidos.

Foram realizados balanços de massa considerando 0 a massa de gusa e de escória no fechamento da corrida anterior e no fim da corrida considerada. A produção de gusa e de escória em cada intervalo de 5 minutos foi calculada a partir da taxa de produção média diária de gusa e do *slag-rate* da carga processada no dia. A massa de gusa e de escória escoada para fora do cadinho foi considerada constante a partir do tempo de corrida de cada um e das massas escoadas e calculada de forma a fechar o balanço de massa.

Intervalos de 5 minutos desde o fechamento da corrida anterior e do sopro geraram os valores de gusa e de escória acumulados pela diferença entre produzido e escoado. Cada intervalo de 5 minutos foi associado a um valor médio de diferença de potencial elétrico (FEM) pela média dos valores lidos a cada minuto.

Uma rede neural associou a massa de escória acumulada em toneladas às variáveis: X_1 = leitura no sensor 2, X_2 = leitura no sensor 4, X_3 = basicidade da escória e X_4 = temperatura do gusa média da corrida.

3 RESULTADOS

3.1 Monitoramento do Nível de Líquidos no Cadinho

Após a implantação do sistema de monitoramento iniciou-se o período de observação e análise dos dados. Durante esse período observou-se que os sinais medidos apresentam coerência com os ciclos de corrida.

Em períodos estáveis, ou seja, com vazamentos e tamponamentos conforme o padrão operacional, sem atraso de corrida, sem fortes retenções de escória e com boa vazão de gusa, verificou-se através da variação da FEM, que não havia fortes acúmulos de líquidos no cadinho devido à eficiência da drenagem, conforme esperado. A Figura 8 mostra quatro corridas em um período de 12 h nos furos de gusa 1 e 3 com valores dentro da faixa estabelecidas para controle do nível. Nota-se que a oscilação da FEM medida é suave e acompanha os vazamentos e tamponamentos, e as pequenas retenções de escória.

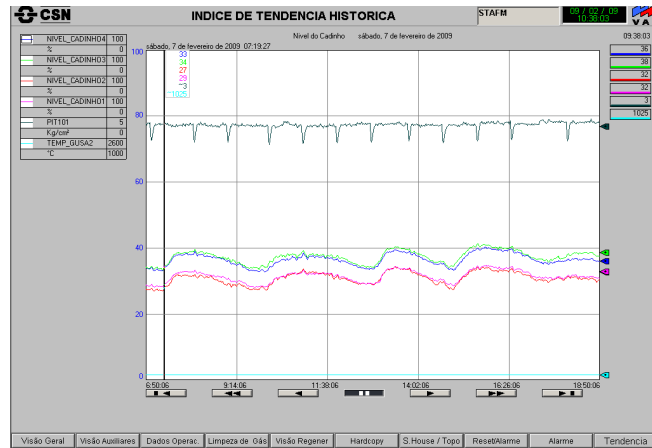


Figura 8: Tela gráfica do nível de líquidos – Período estável.

A abertura e o tamponamento do furo de gusa induzem a variação no nível de líquidos do cadinho, e conseqüentemente, variações no sinal da FEM. Períodos com impossibilidade de vazamento, geram atrasos das corridas, retenção de escória e em alguns casos repetição de corrida no mesmo furo de gusa, que acarretam em acúmulo de líquidos no cadinho, assim como, comprimentos de furo de gusa inferiores e vazão baixa de gusa. Em todas essas situações e em ocorrência de sopro repentino, a medição da FEM apresentou coerência, acompanhando o acúmulo e drenagem de líquidos do cadinho. A Figura 9 mostra um atraso no vazamento com 30 minutos de intervalo entre o fechamento da corrida no FG3 e o início da corrida do FG1. Nota-se uma rápida elevação da FEM durante o período com os dois furos de gusa fechados, passando da faixa normal, seguido de queda a partir do vazamento, voltando ao patamar anterior. A Figura 10 apresenta repetição de 3 corridas no furo de gusa 2, causando uma elevação gradativa no patamar da FEM.

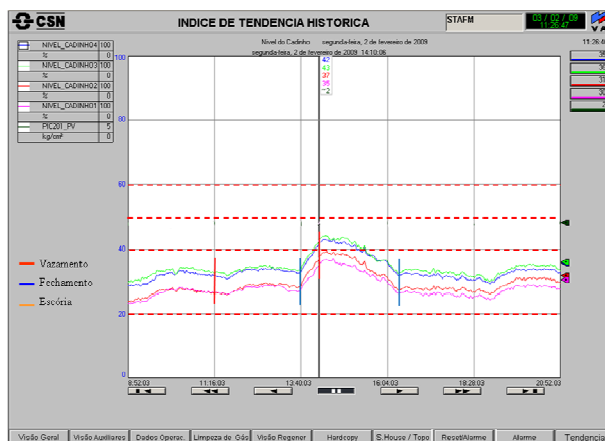


Figura 9: Atraso no vazamento.

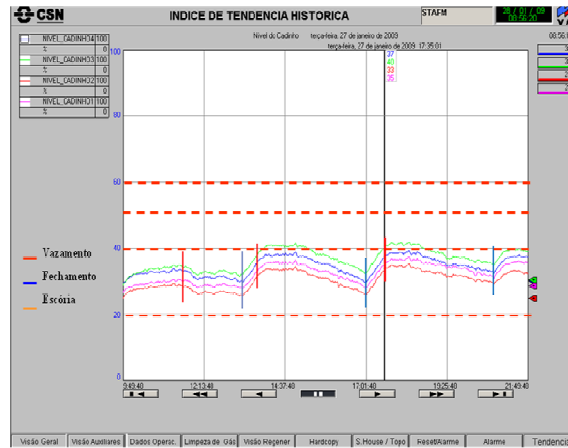


Figura 10: Repetição de corrida.

3.2 Resultados da Rede Neural Artificial

O numero de vetores gerados foi de 242, sendo 200 usados no treinamento e 42 na generalização. Os valores foram normalizados e distribuídos entre 0,01 e 0,99 para reduzir o efeito excludente da função sigmoidal e tabelados em ordem aleatória para o treinamento. Esta normalização dos dados é importante para que todos os neurônios da rede “aprendam” com a mesma velocidade, tornando a rede mais estável. Foi formulada uma rede neural com uma camada de entrada e uma camada intermediária, arquitetura adotada com sucesso em outros modelos semelhantes.⁽³⁾ Entre a camada de entrada e a intermediária foi adotada a função sigmoidal (Equação 2) em que w representam os pesos de cada variável e o b o parâmetro de *bias*. O índice 1 representa a primeira camada da rede, a de entrada e j a ordem da variável na segunda camada. Entre a camada de entrada e a intermediária adotou-se a função linear:

$$Y_{2i} = \sum w_{2i} X_i + b_2$$

O índice 2 representa a segunda camada, a intermediária. O treinamento foi desenvolvido através do Matlab(R). Os parâmetros encontrados estão na Tabela1. A Figura 11 mostra os valores de Y estimado através de balanço de massa com os dados da corrida, contra Y real. Esses resultados em ordem sequencial representam mais claramente a capacidade de estimação (Figura 12).

Tabela 1: Parâmetros da rede neural obtidos no Matlab

1ª camada				
w_{1ij}	1	2	3	4
1	0,1045	0,2030	0,2110	0,0711
2	0,1041	-1,9119	1,6965	1,8788
3	0,1045	0,2030	0,2110	0,0711
4	-2,0767	-1,7910	1,7330	1,2449
b_{1j}	-0,3573	2,4430	-0,3573	-1,7918
2ª camada				
w_{2i}	1,1273	-0,0383	1,3042	-0,383
b_2	-0,0376			

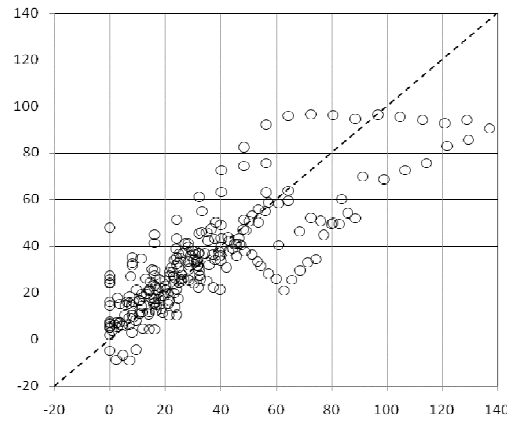


Figura 11: Massa de escória acumulada no cadinho x massa prevista pelo modelo em toneladas.

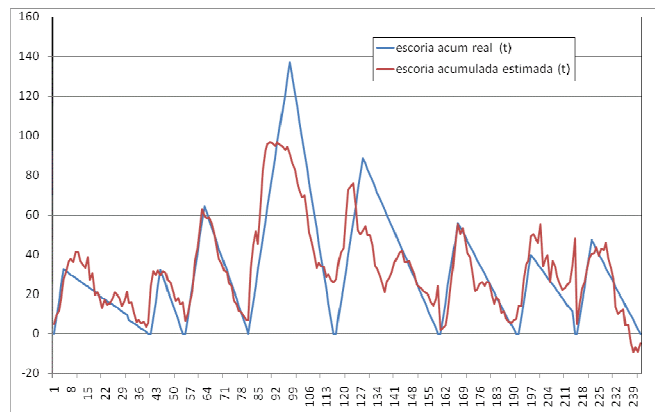


Figura 12: Valores reais (calculados pelos dados das corridas) e valores estimados pela rede neural.

Os resultados foram muito bons para as condições de geração de dados. Os maiores erros foram associados aos dados extremos, especialmente os mais altos. Esse erro pode ser referente a valores incorretos dos dados coletados, sendo necessário um refinamento dos dados antes de inseri-los no modelo. A técnica demonstrou ser efetiva para estimar a massa de escoria retida no cadinho, podendo ser estendida para estimar também a massa de gusa.

4 DISCUSSÃO

Devido ao sinal ter baixa voltagem, existe fatores que geram interferências na medição, prejudicando a análise do sinal da FEM. Essas interferências devem continuar sendo estudadas através da comparação do sinal com as variáveis de controle do alto-forno.

Observamos que em situações de instabilidade operacional, tais como, arriamento de carga, queda no sopro de ar e perda de nível térmico do alto-forno, o sinal da FEM sofreu variações coerentes confirmando que a situação interna do alto-forno estava alterada. As interferências encontradas foram as mesmas citadas pela literatura e por projetos de outras usinas.

5 CONCLUSÃO

O método de medição da FEM possibilitou obter informações on-line e em tempo real sobre a estabilidade do processo e a drenagem de líquidos do cadinho, sendo aplicado à prática operacional do Alto-forno 3 da CSN. A aplicação de redes neurais



artificiais no tratamento dos dados mostrou-se efetiva para estimar a massa de escória retida no cadinho, podendo também ser usada para estimar a massa de gusa, on-line e em tempo real, necessitando apenas de um refinamento prévio dos dados de entrada.

Os resultados apresentados mostram que o método é eficiente para estimar a variação de líquidos no cadinho sendo um novo parâmetro de controle de processo, alcançando o objetivo proposto de se obter uma ferramenta operacional que possibilita o acompanhamento das oscilações do nível de líquidos no cadinho e a operação mais segura do alto-forno.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica Nacional pela oportunidade de realizar e apresentar este trabalho e a todos os que colaboraram com seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 DANLOY, G; STOLTZ, C; CRAHAY, J; DUBOIS, P. *Measurement of iron and slag levels in blast furnace hearth*. Chicago: Ironmaking Conference Proceedings, 1999.
- 2 DOROFEEV, V.N; NOVOKHATXKII, A.M. *Origin of difference in electric potentials on blast furnace shell*. Steel in the USSR, 1984, Vol. 14.
- 3 MEDEIROS, F T P. *Desenvolvimento de um modelo de predição de condições operacionais de altos-fornos siderúrgicos com base em redes neurais artificiais*. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, 2006.