

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE LÍQUIDO NO CADINHO DO ALTO-FORNO A DA BELGO - ARCELOR MITTAL - USINA DE MONLEVADE ¹

Fabiano Harley Araújo ²
Luiz Carlos Figueiredo ³

Resumo

No alto-forno, a informação sobre a real condição de nível de líquido no cadinho constitui ferramenta importante para um melhor gerenciamento das atividades de perfuração e tamponamento do furo de gusa. Tem-se como conseqüência, melhoria da qualidade do gusa, aumento da vida útil do cadinho e melhor da performance do alto-forno. Devido às condições existentes, tais como alta temperatura e pressão, ainda não foi desenvolvido um sensor industrial capaz de medir, continuamente, o nível de líquido no cadinho. No entanto, forças eletromotrizes (FEM) medidas na carcaça do alto-forno podem ser correlacionadas com o nível de líquido no interior do cadinho possibilitando medir, indiretamente, esta variável. A origem da força eletromotriz, o sistema de medição desenvolvido e interferências no sinal são apresentados neste trabalho.

Palavras-chave: Medição de nível de cadinho; Medição de força eletromotriz (FEM); Alto-forno.

SYSTEM OF LIQUID LEVEL MEASUREMENT IN THE HEARTH OF THE BLAST FURNACE A AT BELGO - ARCELOR MITTAL - MONLEVADE WORKS

Abstract

Information on the real condition of the liquid level in the hearth has been considered as an important tool for a better control of the taphole drilling and tapping procedures. In addition, the hot metal quality, hearth useful life, and the blast furnace performance, in general, could be improved. Considering the existing conditions inside the blast furnace such as high temperature and pressure of the liquid, it is not developed yet an industrial sensor for measuring continuously the liquid level in the hearth. On the other hand, electromotive forces (EMF) measured in the blast furnace shell can be correlated with the liquid level in the hearth. This correlation could be used for measuring indirectly the liquid level in the hearth. So the objective of this paper is to present three important aspects associated with the liquid level in the hearth measurement, as follows: the origin of the electromotive force; the development of a measurement system and the signal interferences.

Key words: Hearth level measurement; Electromotive forces (EMF); Blast furnace.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Colaborador do departamento de manutenção da área de gusa da Belgo – Grupo Arcelor Mittal – Usina Monlevade.*

³ *Professor do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UnilesteMG.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores que influenciam a estabilidade operacional do alto-forno é a prática de tamponamento do furo de gusa que deve ser ajustada de acordo com a condição do processo, de forma a assegurar uma consistente e suficiente drenagem do cadinho, segundo Peters et al.⁽¹⁾ Em vários altos-fornos o tamponamento (fechamento) do furo de gusa é realizado quando se dá o início de sopro de gás através do furo de gusa. Já a abertura é determinada basicamente pelo intervalo de tempo de corrida. Esse tempo é definido pela experiência operacional, que é o tempo necessário para a limpeza do canal e do furo de gusa e para a recuperação do nível de líquido no cadinho. Na maioria dos casos, esta regra é bastante eficiente durante a operação normal. No entanto, em períodos em que há distúrbios (como excessivo acúmulo de escória), os procedimentos de tamponamento e abertura do furo de gusa devem ser alterados de acordo com o acúmulo de líquido no cadinho. Também para o incremento da produtividade do alto-forno e a otimização do procedimento de tamponamento, que pode ser obtida através da redução do número de tamponamento por dia, necessitam de informações mais detalhadas sobre o real nível de líquido no cadinho. Devido às condições severas que prevalecem no cadinho como altas temperaturas e pressão, até hoje nenhum sensor industrial foi desenvolvido para a aplicação de medição contínua de nível, de acordo com Danloy et al.⁽²⁾ Um método para disponibilizar a informação de nível de líquido atual no cadinho é realizado através da medição da força eletromotriz (FEM) na carcaça do alto-forno.

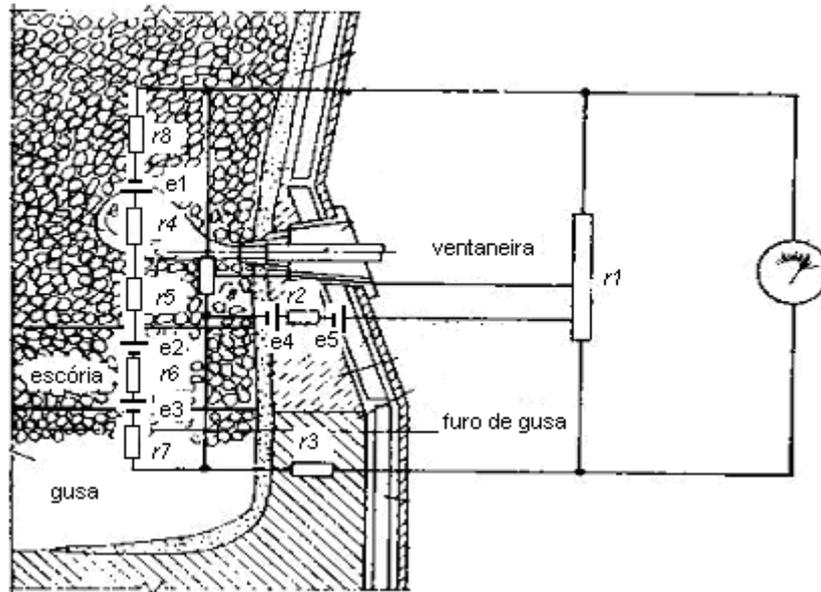
Este projeto apresenta a experiência obtida na implementação do sistema de medição de nível de líquido no cadinho do alto-forno "A" da Belgo - Grupo Arcelor Mittal, através da medição da FEM medida na carcaça do equipamento. Serão abordados: a montagem do sistema, o estudo dos distúrbios apresentados no sinal obtido, os métodos aplicados para sua minimização e propostas para o prosseguimento do trabalho; visando sua utilização na otimização do procedimento operacional.

1.1 Medição do Nível de Líquido no Cadinho

As técnicas conhecidas para medição do nível de líquido no cadinho de altos-fornos são: medição indireta através de modelo matemático baseado em balanços dinâmicos segundo Fukutake e Okabe,⁽³⁾ medição por pressão de gás injetado sob o líquido apresentado por Danloy et al.⁽²⁾ e medição da força eletromotriz induzida na carcaça do alto-forno conforme Dorofeev e Novokhatskii⁽⁴⁾ e Hughes⁽⁵⁾.

1.2 - Origem da FEM na Carcaça do Alto-Forno

Segundo Dorofeev e Novokhatskii⁽⁴⁾ a FEM é formada na região inferior do alto-forno composta pelo cadinho, rampa e ventre. Reações de oxidação que ocorrem na zona de combustão, devido à alta energia cinética proveniente do sopro de ar quente são responsáveis pela força eletromotriz e_1 indicada na Figura 01.



r_1 a r_8 são respectivamente resistências elétricas da carcaça do alto-forno, da resistência de revestimento refratário, de revestimento de blocos de carbono, da chama na região das ventaneiras, do coque do cadinho, da camada líquida de escória, da camada de gusa e da camada de materiais aderentes.

Figura 1. Representação das FEM's geradas na carcaça do alto-forno.⁽⁴⁾

Abaixo da zona de combustão, os óxidos de ferro entram na camada de escória onde, em contato com o coque existente no cadinho, são reduzidos de acordo com a reação de redução direta $FeO_{s1} + C_s = Fe + CO_g$. A ocorrência desta reação forma a fonte e_2 . Através da oxidação do carbono do gusa no cadinho, surge uma fonte de força eletromotriz e_3 cujo valor de tensão depende da polarização e da alteração na corrente. Outras fontes de força eletromotriz são as forças termo-eletromotrizes que aparecem no revestimento do cadinho e_4 e as que surgem nos pontos de contato entre o material de revestimento do cadinho e a carcaça do forno e_5 . No entanto, a tensão nas células e_4 e e_5 é muito baixa. Assim as zonas do forno onde as reações de oxido-redução ocorrem são as regiões nas quais as principais fontes de força eletromotriz aparecem.

A tensão total obtida na carcaça do forno pode ser monitorada utilizando cabos fixados na própria carcaça, interligados a um instrumento de medição. A diferença dos potenciais elétricos na carcaça do alto-forno é resultante das quedas de tensão resultante de todas as fontes de forças eletromotrizes na seção do circuito elétrico apresentado na Figura 1. A presença de várias fontes internas contrárias (representadas por e_1) dependente da temperatura dos materiais situados no cadinho do forno, da taxa na qual as reações de oxido-redução acontecem e também da existência de alteração na resistência das seções do circuito elétrico resultante, por exemplo devido a um revestimento irregular na parede do forno. A resistência desta seção do circuito elétrico (r_5) decremента a partir do incremento do nível de escória devido à resistência elétrica da escória líquida r_6 ser consideravelmente menor que a resistência do coque existente no cadinho r_5 . Quantidades r_6 e r_5 são variáveis. Se a condição térmica do alto-forno é estável e os parâmetros de sopro são constantes, o resultado da diferença de potencial elétrico na carcaça do forno é proporcional ao nível de escória no cadinho.

A mudança na espessura da camada de gusa não altera significativamente a condução elétrica da seção r_7 do circuito devido à sua baixa resistividade elétrica. No entanto, uma variação no nível de gusa provoca conseqüentemente uma variação

no nível de escória que por sua vez, apresenta uma considerável influência na diferença de potencial medida na carcaça do forno.

1.3 Principais Interferências na Medição da FEM

Dorofeev e Novokhatskii⁽⁴⁾ apresentam a influência de alguns fatores operacionais na medição da FEM tais como: deslocamento (arriamento) de carga, parada do alto-forno, alteração da taxa de injeção de carvão pulverizado.

Hughes⁽⁵⁾ afirma que a variação da temperatura na conexão dos sensores na carcaça do alto-forno corresponde à maior fonte de flutuação do sinal FEM. Desta forma, como os materiais do cabo soldado na carcaça do alto-forno e a própria carcaça não são idênticos, pelo efeito Seebek¹, a FEM gerada é adicionada a FEM medida através do medidor de FEM interferindo na medição de nível. Outro fator que pode influenciar o sinal é a indução eletromagnética causada por acionamento de motores maiores dispostos próximos ao circuito do sensor FEM bem como serviços de soldagem elétrica que são realizados na região do alto-forno.

Danloy et al.⁽²⁾ apresentam a correlação de outros fatores que influenciam a medição FEM: pressão de sopra, permeabilidade da carga e temperatura do gusa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Implementação do Sensor de FEM

Dorofeev e Novokhatskii⁽⁴⁾ e Semenko et al.⁽⁶⁾ propõem a montagem dos sensores em vários setores em volta do alto-forno sendo que o cabo ligado ao pondo superior é fixado no final da região da rampa e o ligado ao ponto inferior na região da soleira. Neste tipo de disposição, a diferença de potencial obtida demonstra o comportamento individual do nível em cada setor. Como a escória possui uma viscosidade mais alta com relação ao gusa, no momento do tamponamento, espera-se que a evolução do nível de líquido medido na região do furo de gusa fique mais baixo comparados com os outros setores (o alto-forno da Belgo – usina de Monlevade possui apenas um furo de gusa). Desta forma, é possível medir a evolução do perfil de líquido no cadinho.

Propôs-se inicialmente a implementação de dois sensores em pontos opostos (tomando como referência o posicionamento do furo de gusa). Cada sistema de medição é constituído por um par de cabos de aço isolados eletricamente, fixados através de uma cantoneira soldada diretamente na carcaça do alto-forno. A escolha do cabo de aço para montagem do sensor foi definida em função das características químicas desse material serem mais próximas às características do material que constitui a carcaça do alto-forno, desta forma o efeito Seebek é minimizado. Outros materiais poderiam tornar o sistema de medição mais sensível às variações de temperatura ambiente conforme Peters et al.⁽¹⁾

Cada par de cabos foi ligado em um transmissor de temperatura, que permite que a entrada de sinal seja programada para faixa de tensão (mV), de acordo com o sinal medido pelo sensor de FEM e disponibiliza uma saída (4 a 20 mA), correspondente ao tipo de sinal de entrada disponível no PLC existente para o

¹ O **efeito Seebek** diz que, quando dois metais de composições químicas diferentes são unidos e submetidos a uma temperatura diferente a da temperatura da extremidade aberta (junção de referência) uma FEM é gerada da ordem de mV.

controle do alto-forno. Após a montagem e interligação dos sistemas de medição, as variáveis foram disponibilizadas para a equipe de operação através do sistema supervisorio existente. A Figura 2 apresenta esquematicamente a disposição dos sensores no alto-forno "A".

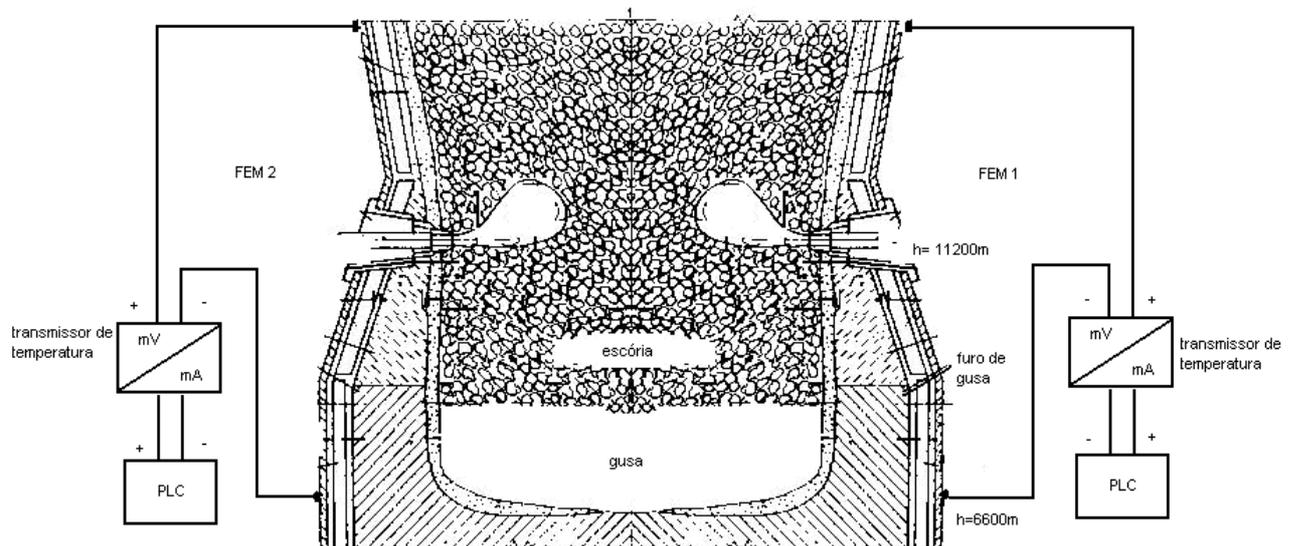
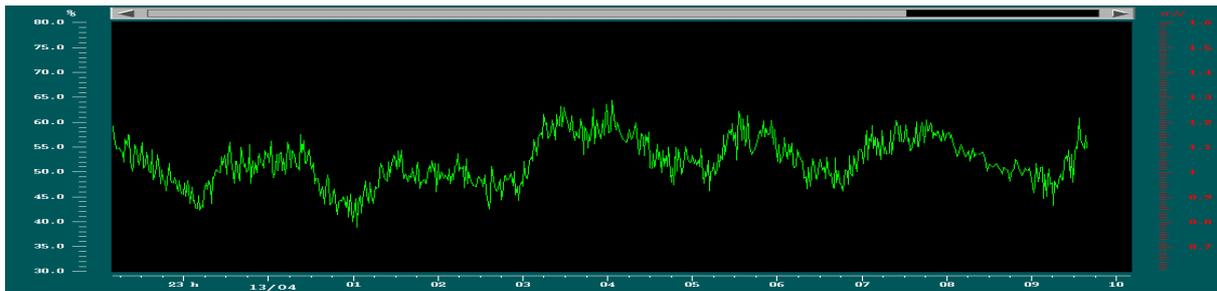


Figura 2. Localização dos sensores FEM no alto-forno "A" da Bélgica

2.2 Ajustes Iniciais do Sinal Obtido

O primeiro problema observado foi baixa sensibilidade do sinal de FEM obtido. Baseado no circuito elétrico equivalente, que explica a geração da FEM na carcaça do alto-forno apresentado por Dorofeev e Novokhatskii.⁽⁴⁾ acredita-se que a amplitude da FEM está correlacionada com os materiais construtivos do alto-forno (tipo aço utilizado na carcaça, tipo e tamanho de blocos refratários utilizados no cadinho) bem como às condições operacionais do processo. Apesar da baixa sensibilidade, percebeu-se que os sinais medidos estavam coerentes com os ciclos de enchimento e esvaziamento do cadinho, porém difíceis de serem interpretados. Para a solução deste problema, as faixas de medição dos transmissores foram redefinidas de forma a se obter a amplitude de variação desejada. O segundo problema observado foi o excesso de ruído nos sinais medidos. Hughes⁽⁵⁾ afirma que esses ruídos estão relacionados com interferências eletromagnéticas. Este tipo de interferência foi confirmado, pois o período onde ocorreu maior índice de ruído correspondeu ao período de parada programada do alto-forno quando serviços de soldagem elétrica na região do alto-forno foram realizados durante a manutenção do equipamento. Objetivando reduzir este tipo de interferência incrementou-se o parâmetro da função "damping"² do transmissor de temperatura de 3s (valor padrão de fábrica) para 15s. A Figura 3 apresenta o sinal de FEM com ruídos provenientes de indução eletromagnética.

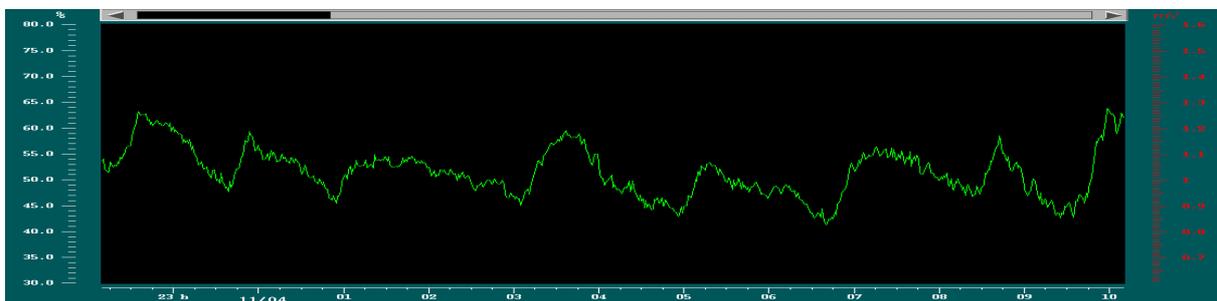
² A função **damping** corresponde a um amortecimento eletrônico que pode incrementar o tempo de resposta do transmissor para suavizar a saída onde houver variações rápidas na entrada.



Fonte: Gráfico de tendência obtido através do sistema de controle do alto-forno.

Figura 3. Sinal FEM com ruído.

A Figura 4 apresenta o sinal FEM sem ruído após o ajuste do filtro com o valor de 15 segundos. As oscilações remanescentes correspondem a fenômenos ainda não identificados, segundo Danloy et al.⁽²⁾



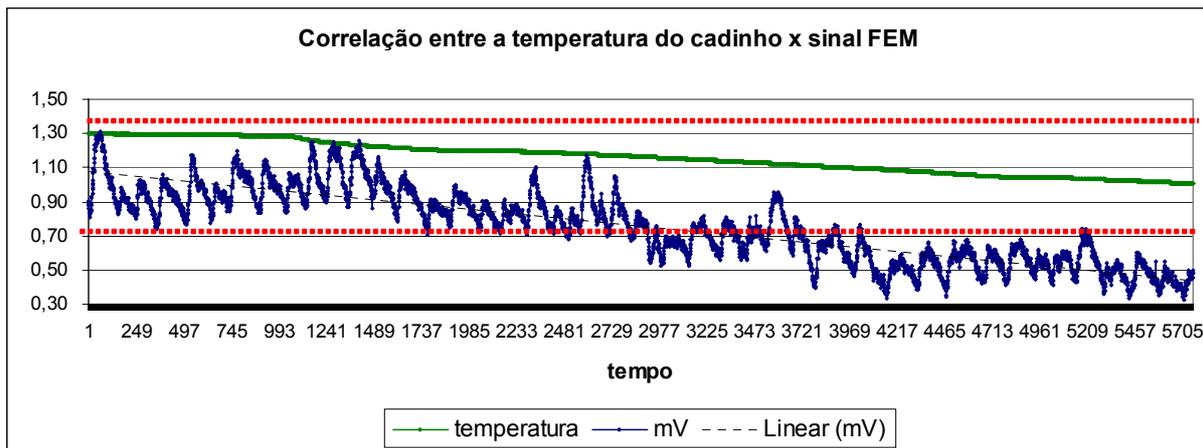
Fonte: Gráfico de tendência obtido através do sistema de controle do alto-forno.

Figura 4. Sinal FEM sem ruído.

2.3 Interferências Observadas

2.3.1 Variação das temperaturas dos blocos de carbono do cadinho

Observou-se um deslocamento dos sinais de FEM medidos. Entende-se por deslocamento do sinal a alteração do posicionamento do sinal dentro da faixa de medição definida, ocorrendo situações em que o sinal excede o limite da faixa estabelecido. Este deslocamento prejudica a análise pois a referência do ponto de enchimento e esvaziamento do cadinho não pode ser estabelecida. Buscando eliminar o problema de deslocamento do sinal FEM, pesquisou-se uma correlação deste fenômeno com outras variáveis disponíveis no sistema de controle do alto-forno. Após várias pesquisas, identificou-se que a variação da temperatura dos blocos refratários no fundo do cadinho (nível 6600m) possui uma alta correlação com o deslocamento do sinal FEM. Este sensor de temperatura está localizado na região onde está fixada a parte inferior do sensor FEM. Em condições normais, esta temperatura tende a se estabilizar em um determinado valor porém, em condições específicas, pode haver queda ou elevação da temperatura indicando a formação ou dissolução (bode) de uma camada de gusa alterando o valor do sinal FEM medido. A Figura 5 apresenta a redução da temperatura medida no bloco refratário localizado no fundo do cadinho e o deslocamento do sinal FEM medido. Observa-se a existência de uma correlação entre as duas variáveis.



Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno

Figura 5. Temperatura do fundo do cadinho x sinal FEM.

Para que se possa prever o momento mais adequado para o tamponamento do furo de gusa, a FEM deveria se comportar conforme mostrado na Figura 6. Nesta situação ilustrada que se pode considerar ideal, o sinal FEM no fim do esgotamento atinge sempre o mesmo valor neste caso, antes que se inicia o sopro de gás através do furo de gusa, o tamponamento poderia ser realizado antecipadamente de forma a prevenir o desgaste na região do cadinho.

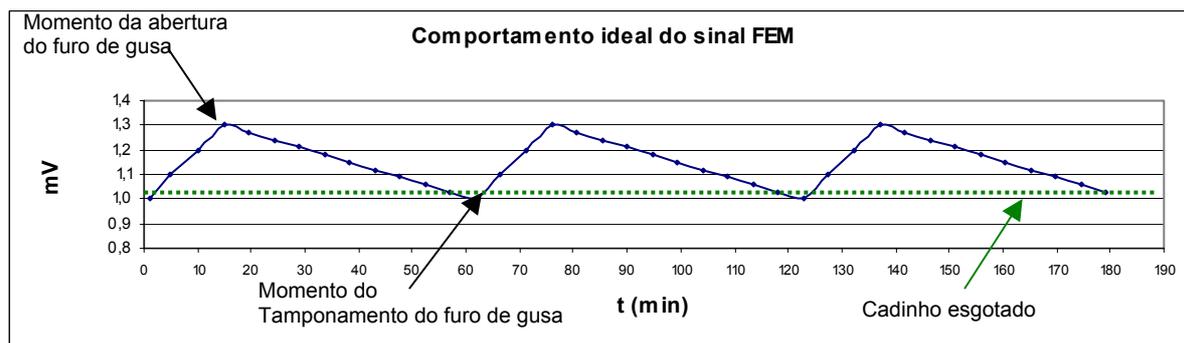


Figura 6. Comportamento ideal do sinal FEM.

2.3.1.1 Análise da correlação da temperatura do cadinho com o sinal FEM

Depois de identificado a existência de uma correlação entre o sinal FEM e a temperatura medida no fundo do cadinho, objetivou-se a correção desta interferência. Para a determinação do modelo de correção aplicou-se o método de regressão linear baseado nas informações obtidas através da análise dos gráficos registrados no período em que houve a queda de temperatura medida no fundo do cadinho (elevação 6600m) Os valores de referência correspondem aos valores medidos na situação de estabilidade operacional. Nesta situação, a temperatura do cadinho apresenta um valor de 222°C e o sinal FEM medido corresponde a 1mV antes do tamponamento do furo de gusa. Desta forma, os seguintes parâmetros foram utilizados:

T_{ref} = temperatura de referência (222°C)

T_{real} = temperatura real (medida no bloco refratário, elevação 6600m)

FEM_{cor} = sinal FEM corrigido

FEM_{real} = sinal FEM medido

O valor de k (constante definida para a correção) como segue:

Através da análise do gráfico obtido verificou-se a relação entre a temperatura e o sinal FEM antes e após a variação da temperatura, obteve-se os seguintes valores de relação:

$$222^{\circ}C \longrightarrow 1,0mV$$

$$170,92^{\circ}C \longrightarrow 0,472mV$$

Desta forma,

$$51,08^{\circ}C \longrightarrow 0,528mV$$

Aplicando a regressão linear, tem-se:

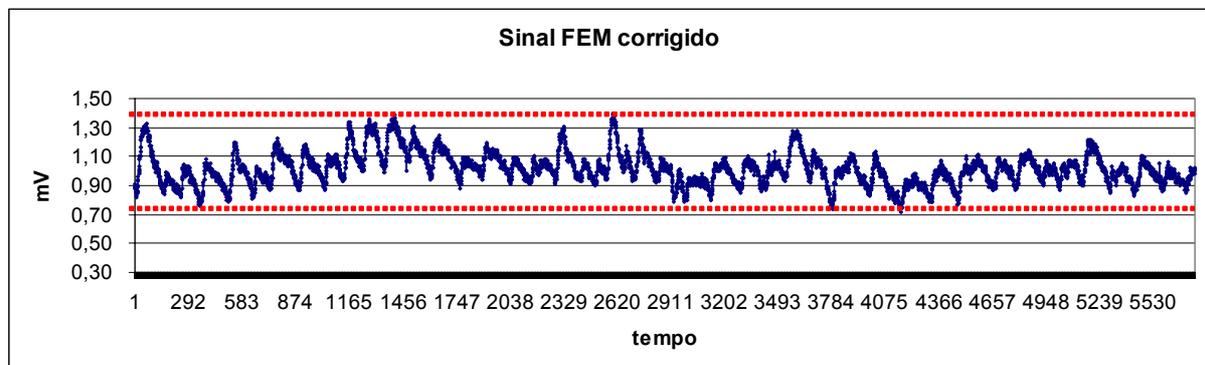
$$FEM_{cor} = [(222^{\circ}C - T_{real}) \times 0,528mV] \div 51,08^{\circ}C + FEM_{real}$$

Simplificando, obteve-se:

$$FEM_{cor} = (222^{\circ}C - T_{real}) \times 0,010337 + FEM_{real}$$

$$k = 0,010337$$

Implementou-se o modelo no sinal FEM através do PLC. O resultado obtido está apresentado na Figura 7.



Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno

Figura 7. Sinal FEM corrigido em função da temperatura do cadinho.

O resultado da correção pode ser observado comparando com a situação anterior apresentada através da Figura 06. Realizou-se a avaliação do modelo de regressão sendo que o coeficiente de determinação ajustado (R^2) do modelo foi igual a 74,3 %, significando que o modelo ajustado utilizando a variável regressora (temperatura do cadinho) consegue explicar aproximadamente 74,3% da variação total presente na variável resposta (Sinal FEM). A Figura 08 apresenta a análise da regressão linear.

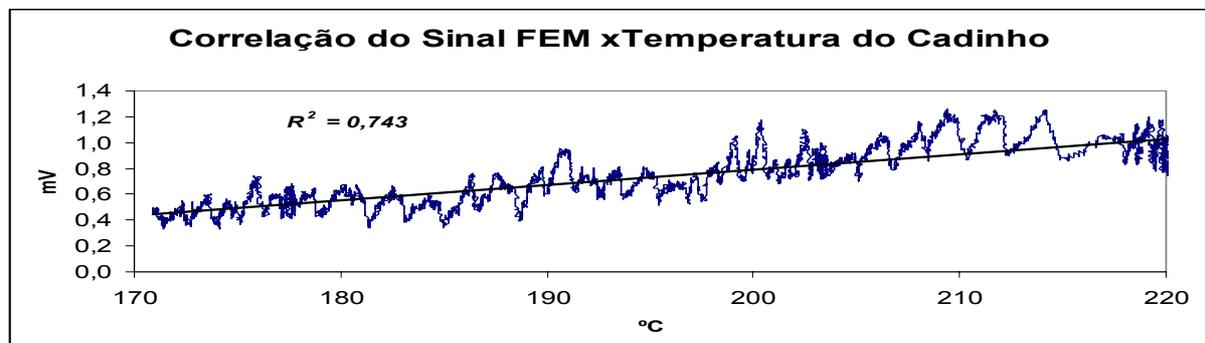
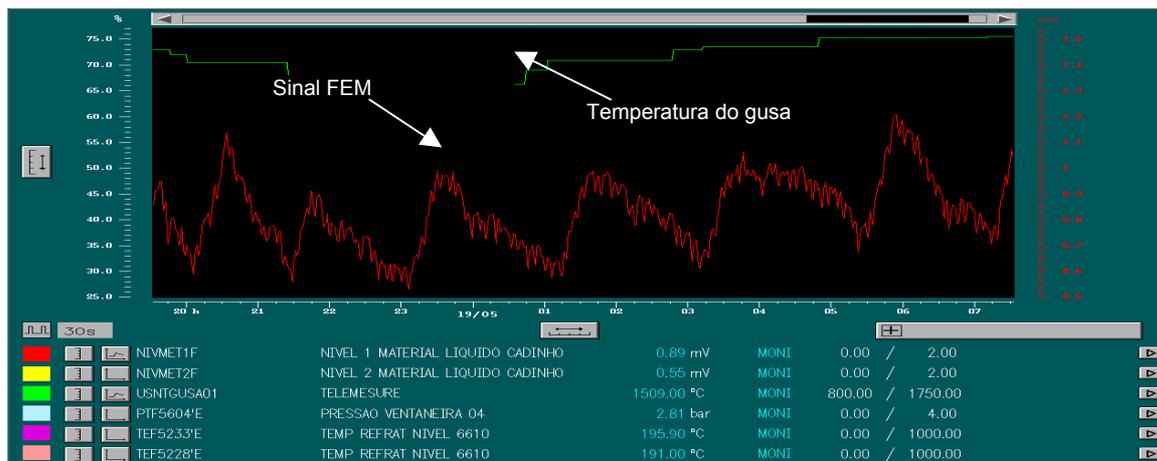


Figura 8. Análise de regressão linear do sinal FEM x temperatura do cadinho.

2.3.2 Variação da temperatura do gusa

Em condições normais, a temperatura de gusa, deve estar em torno de $1500^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$. Variações maiores podem ocorrer devido à instabilidade operacional. Segundo Danloy et al.,⁽²⁾ a temperatura de gusa corresponde a uma das variáveis que influenciam na medição da FEM. Desta forma, buscou-se verificar a correlação entre os dois sinais, sendo que o sinal FEM analisado já está corrigido com relação à temperatura do cadinho. A medição da temperatura é realizada através de lança pirométrica e os intervalos de medição são pré-definidos e correspondem a 30 minutos após o início de escória. A Figura 9 apresenta a evolução da temperatura de gusa e a medição do sinal FEM no mesmo período de amostragem.



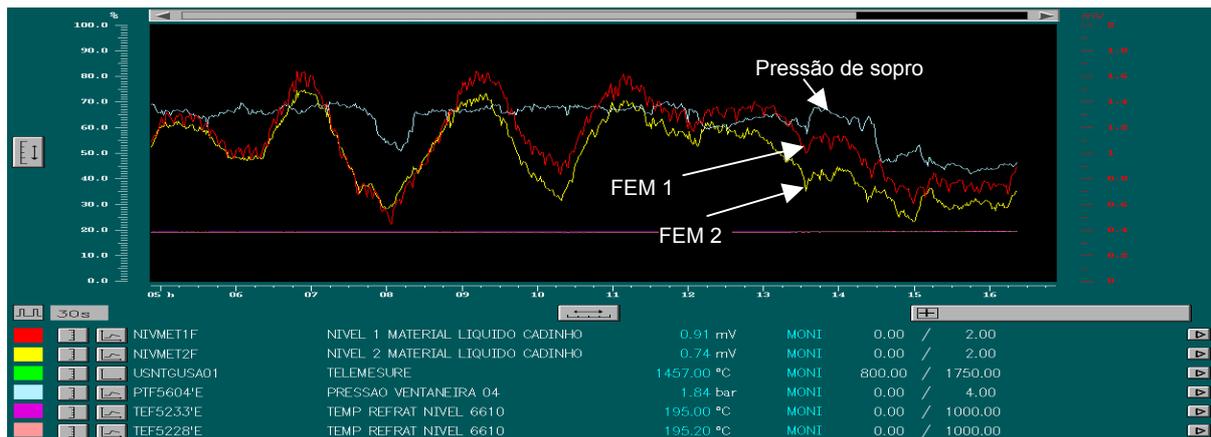
Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno.

Figura 9. Evolução da temperatura do gusa x sinal FEM.

Observa-se a existência de correlação entre a temperatura do gusa e o sinal FEM. Nesta etapa do trabalho objetivou-se apenas confirmar a existência de correlação entre essas duas variáveis.

2.3.3 Variação da pressão de sopro

Sabe-se que pressão de sopro é afetada por diversos fatores como a escolha dos parâmetros operacionais (vazão, taxa de injeção de O_2 , contra-pressão), variações na qualidade das matérias-primas e esgotamento do forno. Em condições normais de operação esta pressão tende a ser estável. Danloy et al.⁽²⁾ verificaram que a pressão de sopro corresponde à outra variável que influencia na medição da FEM. Verificou-se a correlação entre os dois sinais. A Figura 10 apresenta a evolução da pressão medida na região das ventaneiras e a medição do sinal FEM corrigido, no mesmo período de amostragem.



Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno.

Figura 10. Evolução da pressão na região das ventaneiras x sinal FEM 1 e 2.

Analisando este período de amostragem observa-se a existência de uma correlação da pressão medida na região das ventaneiras com os sinais FEM's. Verifica-se que quando houve redução da pressão os sinais de FEM's também reduziram. Desta forma, os sinais FEM's também deverão ser corrigidos em função da pressão. Como no caso da interferência da temperatura de gusa, nesta etapa objetivou-se confirmar a existência de correlação entre essas duas variáveis.

2.4 Futuros Passos

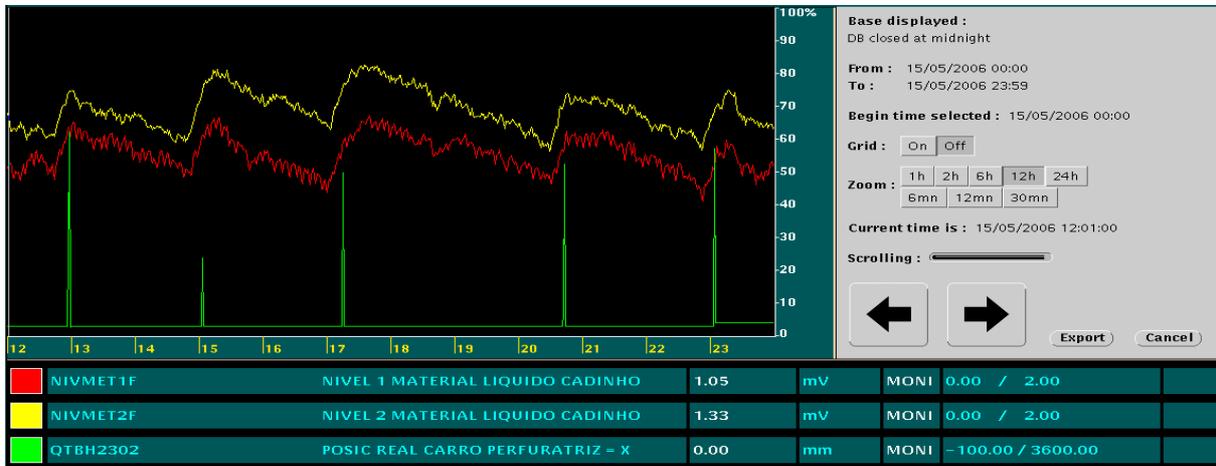
Para a conclusão do trabalho os seguintes itens deverão ser realizados:

- Estudo e definição do método mais eficaz para a correção das interferências identificadas,
- Pesquisa e correção da influência da temperatura do gusa,
- Pesquisa e correção da influência da pressão na região das ventaneiras,
- Pesquisa e correção da influência da variação da temperatura na conexão do sensor com a carcaça do alto-forno,
- Pesquisa da correlação do comprimento do furo de gusa com o nível de líquido medido,
- Após as correções, montagem de dois novos sensores objetivando monitorar o nível em cada quadrante do cadinho,
- Criação da tela no sistema supervisor para a indicação no nível de líquido no cadinho do alto-forno.

3 RESULTADOS

Os sinais dos sensores de FEM foram disponibilizados para a operação através de um gráfico de tendências no sistema supervisor do alto-forno. A Figura 11 apresenta um determinado período de amostragem dos sinais dos sensores de nível de líquido no cadinho (NIVMET1F), (NIVMET2F) e o sinal de posicionamento real do carro da perfuratriz (QTBH2302). Observa-se que após a abertura do furo de gusa, indicada quando ocorre o avanço do carro da perfuratriz, inicia-se o decremento dos sinais de níveis de líquidos do cadinho. Este comportamento é esperado pois esse é o momento correspondente à abertura do furo de gusa. O tempo de tamponamento também pode ser medido com precisão, correspondendo à diferença entre o instante em que ocorre a perfuração e o tempo do tamponamento.

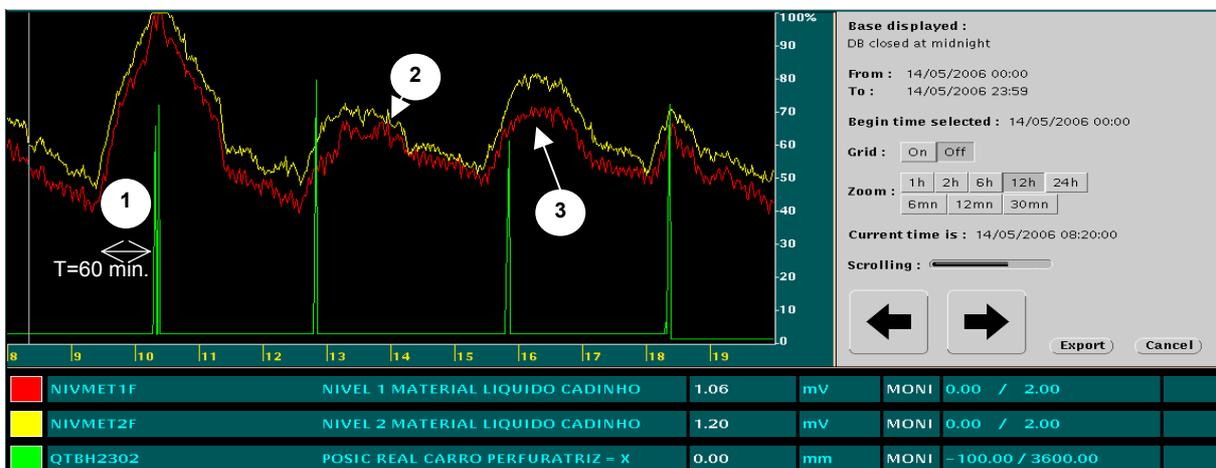
O tempo do tamponamento pode ser identificado através do pico inferior medido pelos sensores de nível de líquido no cadinho pois, após o tamponamento inicia-se o acúmulo de líquido. Em condições normais, como apresentado anteriormente, este tempo deve estar em torno de 13 minutos.



Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno

Figura 11. Análise dos sinais FEM (processo em condições normais)

A Figura 12 mostra o comportamento do nível do cadinho medido através dos sensores FEM em um período que houve problemas no processo. O primeiro problema que pode ser verificado (1) corresponde a um tempo de tamponamento do furo de gusa anormal de 60 minutos. Buscando a verificar a causa, constatou-se que a operação necessitou aumentar esse tempo devido à falta de disponibilidade de carro torpedo para receber o gusa. Nesta situação, além do aumento do tempo de tamponamento reduz-se também a vazão de sopro reduzindo a produção. Os problemas identificados como 2 e 3 mostram a ocorrência de retenção de escória. Se após a perfuração do furo de gusa (indicada pela variável QTBM2302) o nível de líquido continuar aumentando é indício de que está ocorrendo a retenção de escória no cadinho. Os sensores de nível de líquido do cadinho permitem a identificação desse fenômeno. Após a identificação, a operação pode agir preventivamente como por exemplo, aumentando o diâmetro da broca da perfuratriz de forma a normalizar o processo.



Fonte: Dados obtidos através do sistema de controle do alto-forno

Figura 12. Análise dos sinais FEM (processo com problemas)

Desta forma, a disponibilização dos sinais dos sensores de nível do cadinho atualmente é uma ferramenta de suma importância para a confirmação das condições operacionais do alto-forno permitindo a tomada antecipada e ações corretivas em caso de anomalias.

4 CONCLUSÃO

A medição da diferença de potencial elétrico na carcaça do alto-forno (sinal FEM) é um método simples e eficiente para a determinação da evolução do nível de líquido no cadinho. O sistema permite um melhor controle do processo através da indicação da condição do esgotamento do cadinho.

Por se tratar de um sinal de baixa amplitude de tensão, este está sujeito a vários tipos de interferências. Algumas das interferências conhecidas foram confirmadas tais como ruído por indução eletromagnética, variação da temperatura do gusa e variação da pressão de ar soprado através das ventaneiras. Descobriu-se que uma interferência que apresenta grande influência no sinal corresponde à temperatura medida nos blocos de carbono na parte inferior do cadinho. A correção deste ruído foi realizada melhorando significativamente a qualidade do sinal.

Propõe-se para a continuação deste trabalho o prosseguimento da pesquisa das interferências no sinal FEM, estudo de um método mais eficaz para a eliminação das interferências e montagem de novos sensores para indicação do perfil de líquido no cadinho.

REFERÊNCIAS

- 1 Peters, M. et al. **Determination of the liquid level in the hearth of the blast furnace**, Ironmaking Conference Proceedings., 2001. pp. 283-295.
- 2 Danloy, G., C. Stoltz, J. Crahay, P. Dubois. **Measurement of iron and slag levels in blast furnace hearth**, Chicago: Ironmaking Conference Proc., 1999. pp. 89-98.
- 3 Fukutake, T., Okabe, K. **Influences of slag tapping conditions on the amount of residual slag in the blast furnace hearth**, Transactions ISIJ, 1976, Vol. 16, pp.317-323.
- 4 Dorofeev V.N., Novokhatskii A. M. **Origin of difference in electric potentials on blast furnace shell**, Steel in the USSR, 1984, Vol 14, pp. 10-12.
- 5 Hughes, M., **Summary of BHP ce with blast furnace EMF sensors**, Australia: BHP Research Laboratories, 1996.
- 6 Semenko, A. Ya., Shatan'ko, N.I., Dyshlevich, I.I. **Automatic monitoring system for melt level in blast furnace hearth**, Steel in the USSR, 1984, Vol. 14, pp. 215-216.