

REDUÇÃO DO POWER ON E CONSUMO ENERGÉTICO DO FEA DA VOTORANTIM RESENDE ATRAVÉS DE REGULAGEM ELÉTRICA E QUÍMICA¹

*Pedro Henrique Coutinho²
Bruno Veiga Fontana³
José Fernando Cerqueira⁴
Jonathan Nicholas da Silva Navarro⁵
Alexandre Alves Mendonça⁶
Emanuel Villanova⁷*

Resumo

O processo do forno elétrico a arco (FEA) promove a fusão da carga metálica e aquecimento do banho líquido através do fornecimento de energia proveniente do arco elétrico, das reações químicas de oxidação do gás natural injetado, carbono e outros elementos presentes. A Injeção de oxigênio e a adição de fundentes possibilitam também o refino primário do aço. O correto controle destas formas de energia possibilita a otimização da eficiência energética, produtividade e demais indicadores de desempenho em um FEA. No FEA da Votorantim Resende foram efetuados ajustes e testes visando adequação da Potência Elétrica e Química. Essa adequação, teve como resultado a redução de 17% no *Power On*, 11,7% no consumo de energia elétrica, 40,7% no consumo de gás natural, 7,14% no consumo de oxigênio e aumento na produção de aproximadamente 9% ao mês sem nenhum investimento, mas sim somente otimização da Regulagem do FEA.

Palavras-chave: Forno elétrico; Energia elétrica; Regulagem elétrica; Produtividade.

REDUCTION OF POWER ON AND ENERGY CONSUMPTION THROUGH CHEMICAL AND ELECTRICAL ADJUSTMENT AT EAF OF VOTORANTIM SIDERURGIA RESENDE

Abstract

The EAF Process promotes metallic charge melting and bath heating through energy supply from electric arc and chemical reactions by oxidation of natural gas injected, carbon and other elements. The Oxygen Injection and fluxes addition also enable the primary refining of steel. The proper control of these forms of energy can improve energy efficiency, productivity, and other performance indicators in a steelworks. In the Electric Arc Furnace (EAF) of Votorantim Resende adjustments were made and tests aimed adequacy of Electric Power Program and Chemistry. This improvements, resulted reducing 17% in Power On Time, 11,7% in EAF Electrical Energy Consumption, 40,7% Natural Gas Consumption, 7,14% Oxygen Consumption and increasing production of approximately 9% per month without any investment, but only optimization of EAF regulation.

Key words: Electrical arc furnace; Electric power; Electric adjustment; Productivity.

¹ *Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista. Engenheiro de Processo. Votorantim Siderurgia. Resende, Brasil.*

³ *Graduando em Engenharia Metalúrgica. Votorantim Siderurgia. Resende,, Brasil.*

⁴ *Técnico Mecânico. Técnico Especializado do FEA. Votorantim Siderurgia. Resende,, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista. Coordenador de Produção. Votorantim Siderurgia. Resende,, Brasil.*

⁶ *Engenheiro Metalurgista. Consultor de Tecnologia Metalúrgica (Votorantim Siderurgia)*

⁷ *Administrador. Gerente de Aciaria. Votorantim Siderurgia. Resende,, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

No campo de produção de aço via fornos elétricos a arco são normalmente adotados controles restritos dos indicadores como produtividade (*tap to tap*, tempo de forno ligado – *power on* e *Power off*), consumos energéticos (energia elétrica, gás natural, oxigênio, carburantes) e rendimento metálico. Na Figura 1 podemos observar os últimos aportes tecnológicos ocorridos em fornos de todo o mundo, visando maximizar a eficiência e produtividade, mas reduzindo o consumo energético, no intuito de reduzir os custos de produção.

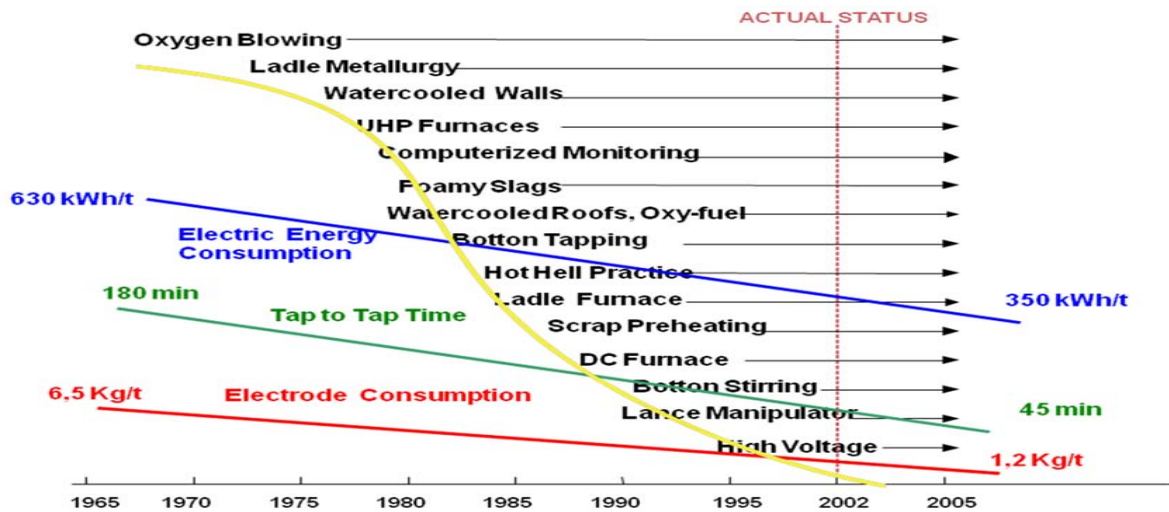


Figura 1. Evolução tecnológica dos fornos elétricos.⁽¹⁾

Um forno elétrico (Figura 2) consiste basicamente de um sistema alimentador elétrico, subdividido em transformador de alta potência, reator série, braços porta eletrodos e eletrodos. Para seu funcionamento, os eletrodos devem ser alimentados, provocando curtos circuitos que tem capacidade de concentrar a energia suficiente para fundir a carga metálica. Os fornos se caracterizam por trabalhar com corrente alta e tensões baixas, que circulam pelo arco elétrico e transferem energia para a carga (Figura 3).⁽²⁾

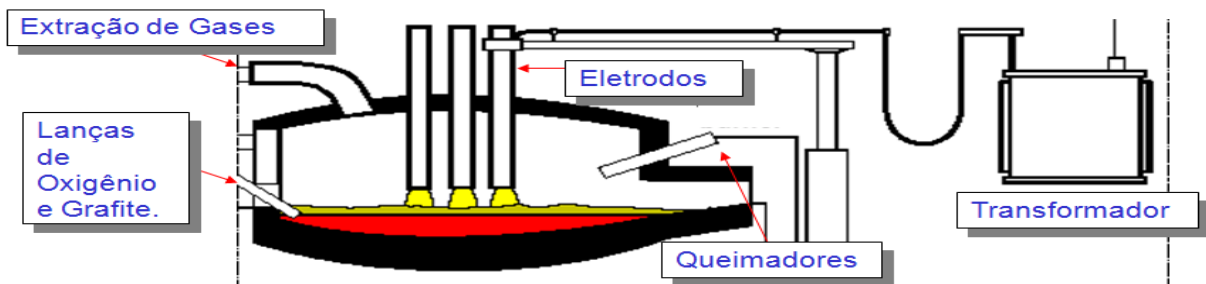


Figura 2. Desenho esquemático de um forno elétrico.

No período de condução do arco elétrico, a corrente passa em um meio gasoso, chamado de plasma, submetido a temperaturas de até 15.000°C. Os reguladores de eletrodos modernos funcionam buscando manter uma determinada relação entre tensão e corrente, e como a etapa de fusão é bastante instável, por diversas vezes os reguladores enviam um sinal de subida dos eletrodos, o que interrompe a corrente e ocorre a extinção do arco.⁽²⁾

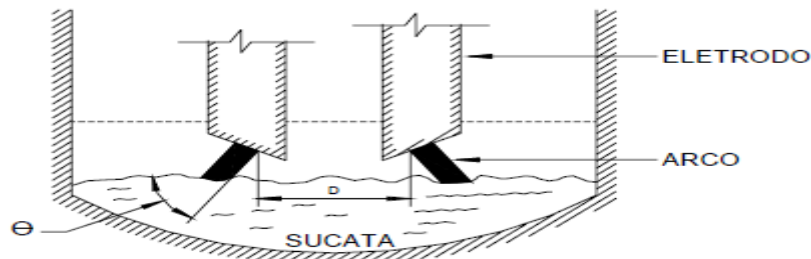


Figura 3. Desenho esquemático mostrando eletrodos, arco elétrico e sucata.⁽²⁾

No entanto, a re-ignição do arco só ocorre caso se atinja um patamar mínimo de tensão, logo enquanto isso não acontece, o arco permanece extinto até que o limite mínimo de tensão seja atingido. Este fenômeno pode ser visto na Figura 4a. Quando comparamos duas configurações que utilizam a mesma tensão, porém com diferentes fatores de potência, existe alteração do tempo necessário para que haja a re-ignição, podendo até mesmo chegar a zero, fato que é chamado de re-ignição instantânea. Esta comparação pode ser vista na Figura 4.

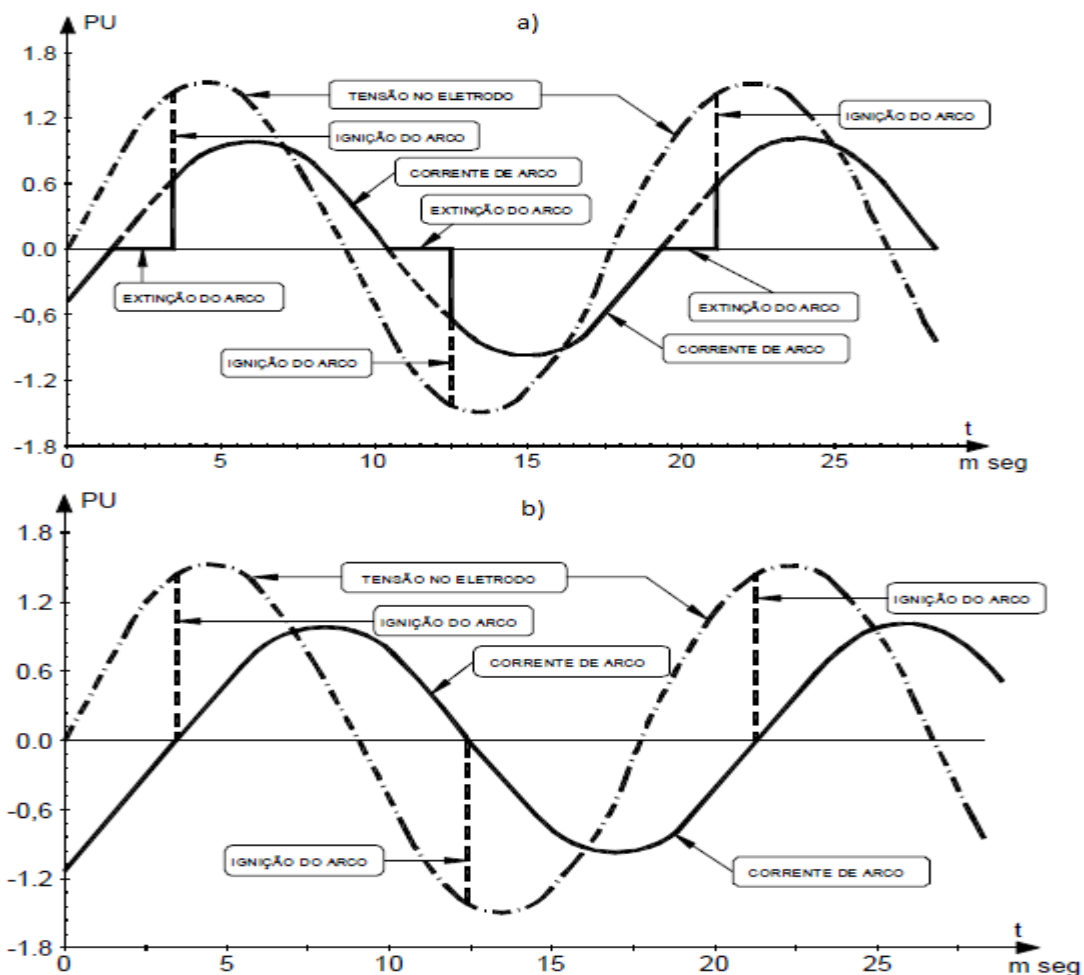


Figura 4. Sistemas com mesma tensão trabalhando com fator de potência de (a) 0,37; e (b) 0,66 em um sistema de 60 hz.⁽²⁾

Em um Forno Elétrico a Arco recomenda-se trabalhar com fatores de potência entre 0,65 e 0,75 nas etapas de perfuração e fusão (valores considerados baixos), justamente para aumentar a estabilidade do arco e conseqüentemente aumentar a eficiência do processo. Já no fim da fusão e, sobretudo, no refino, o arco fica estável

e esta estabilidade não depende do fator utilizado. Por isso, inclusive, sugere-se trabalhar com fatores de potência acima de 0,75 e com a maior tensão possível, desde que seu volume de escória seja maior que o comprimento de arco.⁽³⁾

No processo do FEA, quando o banho já está plano, a escória tem papel fundamental para aumentar ainda mais a estabilidade do arco, podendo aumentar de 3% a 6% a potência ativa nesta etapa. Uma escória espumante de boa qualidade aliada a uma configuração de comprimento de arco adequada podem aumentar significativamente a eficiência energética, assim como é mostrado no gráfico da Figura 5.⁽⁴⁾

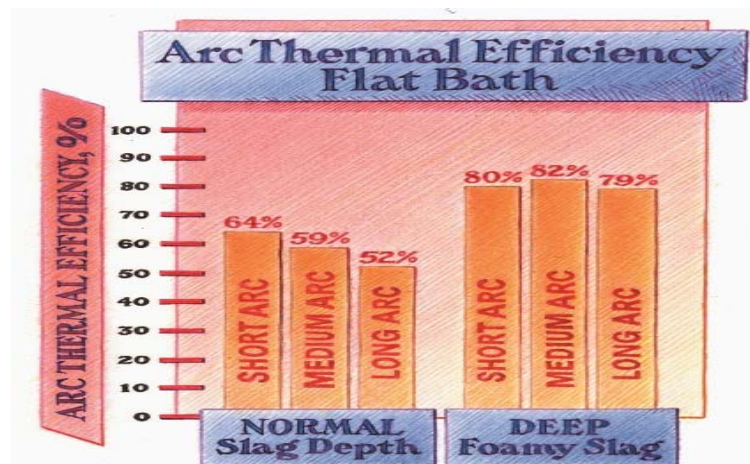


Figura 5. Eficiência de arco em função de seu tamanho e da qualidade da escória.⁽⁴⁾

Outro ponto importante no que diz respeito ao processo do FEA é a energia química, principalmente, o oxigênio, pois sua utilização pode substituir em partes a energia elétrica (as reações de oxidação geram energia para o processo), conforme a Figura 6. Inclusive, o oxigênio é mais barato e tem custo de implantação menor, podendo ser uma solução simples para usinas com transformadores limitados.⁽⁴⁾

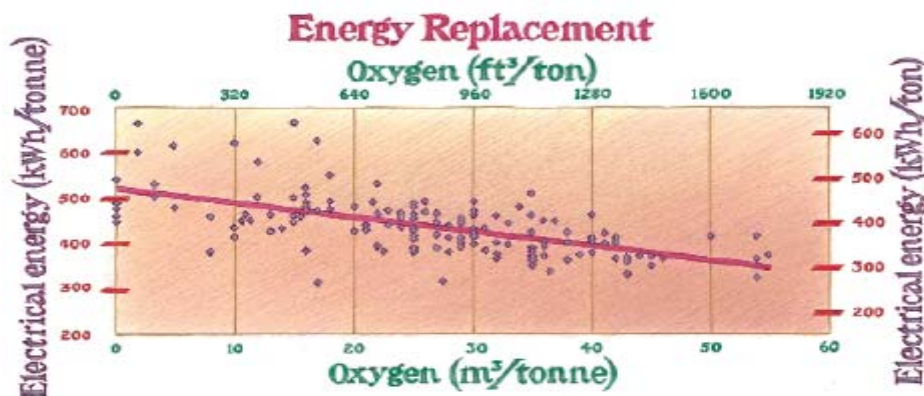


Figura 6. Consumo de energia elétrica em função do consumo específico de oxigênio.⁽⁴⁾

Um ponto importante sobre a injeção de oxigênio é a coerência do jato (Figura 7), aumenta com o aumento da vazão de oxigênio. Com o aumento da coerência do jato, a penetração no banho é maior, o que contribui para uma maior homogeneização de temperatura e composição química.⁽⁵⁾ Na Figura 8 é comparado esquematicamente um jato coerente e um não coerente, e assim, pode-se dizer que como um jato não coerente possui um leque maior, ele tem a tendência a oxidar

uma maior área do banho, o que contribui para o aumento da formação do FeO, prejudicando o rendimento metálico do FEA.

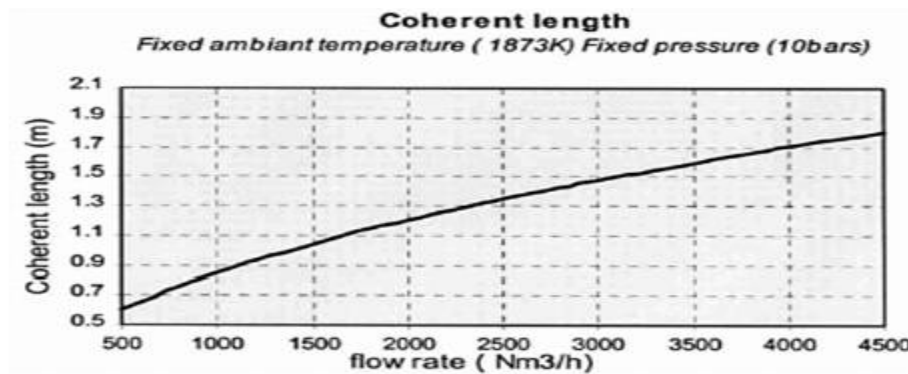


Figura 7. Distância de jato coerente em função da vazão de oxigênio.⁽⁵⁾

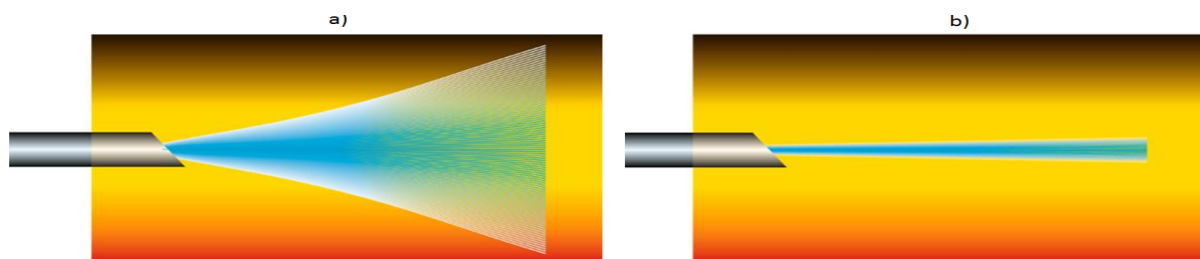


Figura 8. Desenho esquemático mostrado um jato (a) não coerente; e (b) coerente.

O objetivo deste trabalho foi identificar os parâmetros de processo que mais influenciam no desempenho do FEA, no que diz respeito a energéticos, rendimento metálico e produtividade. Para isso, foram utilizadas ferramentas estatísticas aliadas ao conhecimento técnico para a obtenção dos resultados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Identificação do Problema

Para o aumento do volume de produção é extremamente importante garantir um *Power On* competitivo. No FEA de Resende, para se atingir o volume de produção nominal considerou-se um *Power* nominal de projeto. Porém, como se pode ver na Figura 9, a realidade tem sido bem diferente. Em relação ao consumo de energia, observa-se que o gráfico apresenta mesma tendência do gráfico de *Power On*, ou seja, com o aumento do tempo de forno ligado o consumo energético tenderá a aumentar, já que $Energia = Potência \times Tempo$.

O%FeO, assim como a energia e *Power On*, estava acima do aceitável, que é 35%. Para se ter uma ideia, apenas nos meses de novembro e dezembro de 2011 e em janeiro de 2012 que se chegou neste patamar.

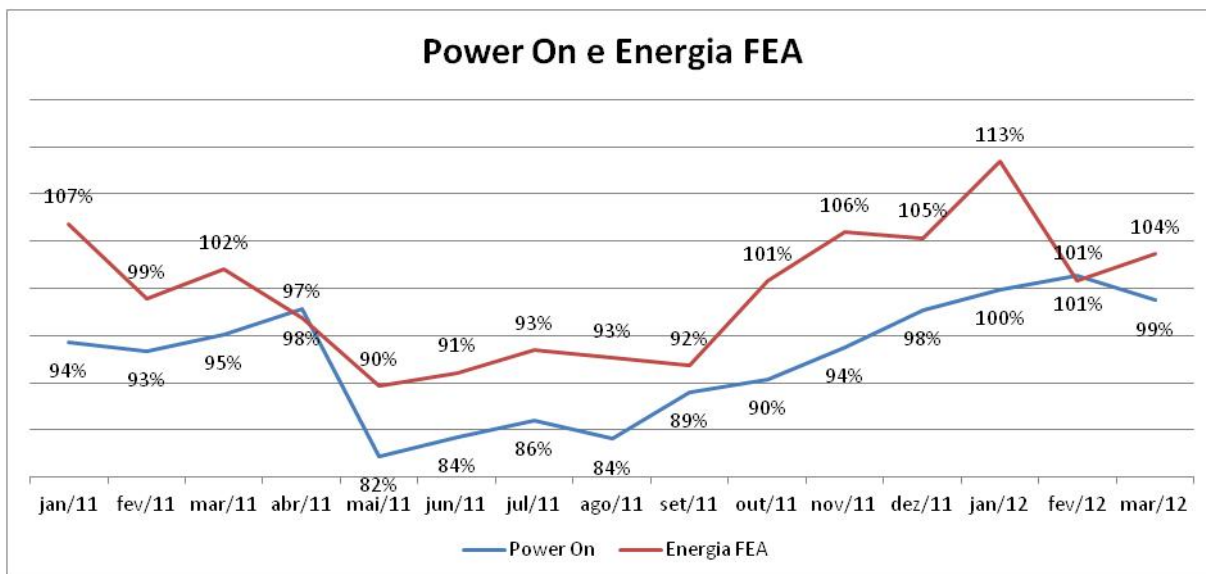


Figura 9. Evolução do *Power On* e Energia do FEA de Resende (2012).

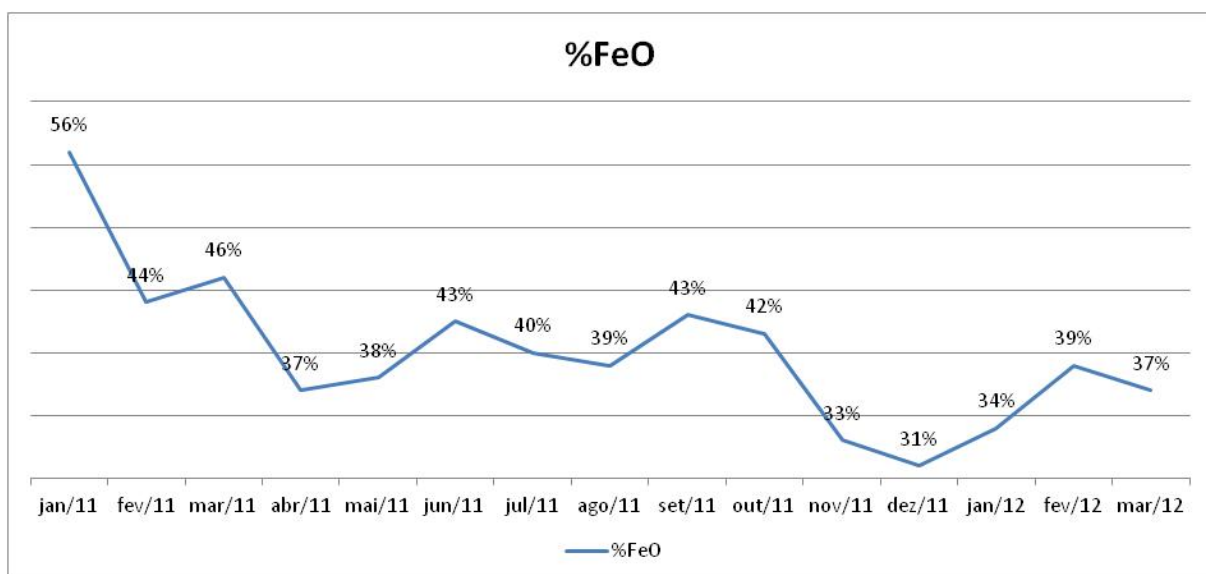


Figura 10. Evolução do FeO.

2.2 Análise do Problema

Antes de partir para uma análise técnica a respeito dos parâmetros elétricos e químicos do FEA, foi feita uma análise mais simples utilizando o *Box Plot* visando averiguar se o problema (*Power On* e Energia) estava concentrado em alguma das letras ou até mesmo se alguma letra era superior as outras, a fim de encontrar alguma boa prática que não era realizada por todos. Conforme as Figuras 11 e 12, com 99% de confiança não existe diferença entre as turmas, tanto no *Power On* quanto no consumo de energia.

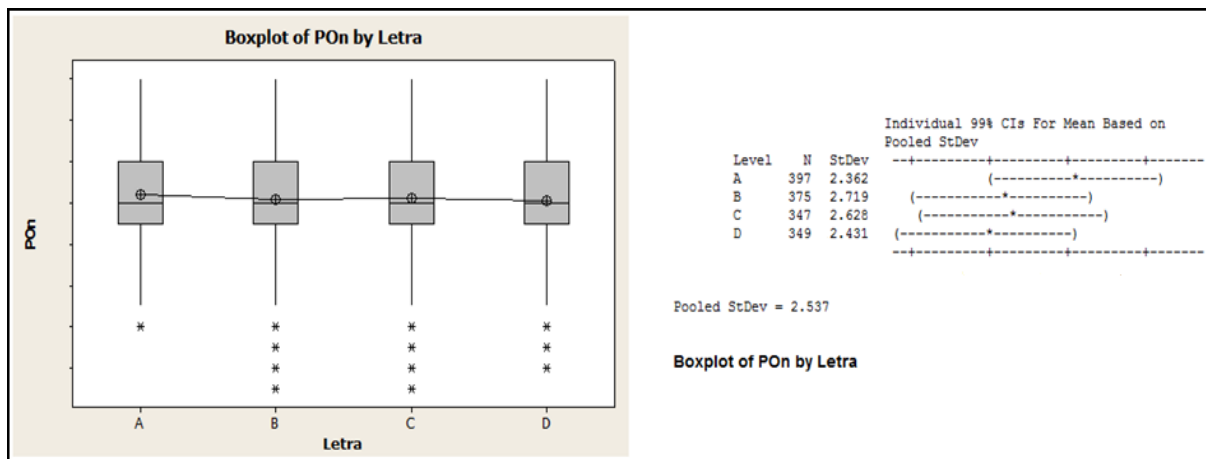


Figura 11. Box plot do Power On comparando os 4 turnos de revezamento.

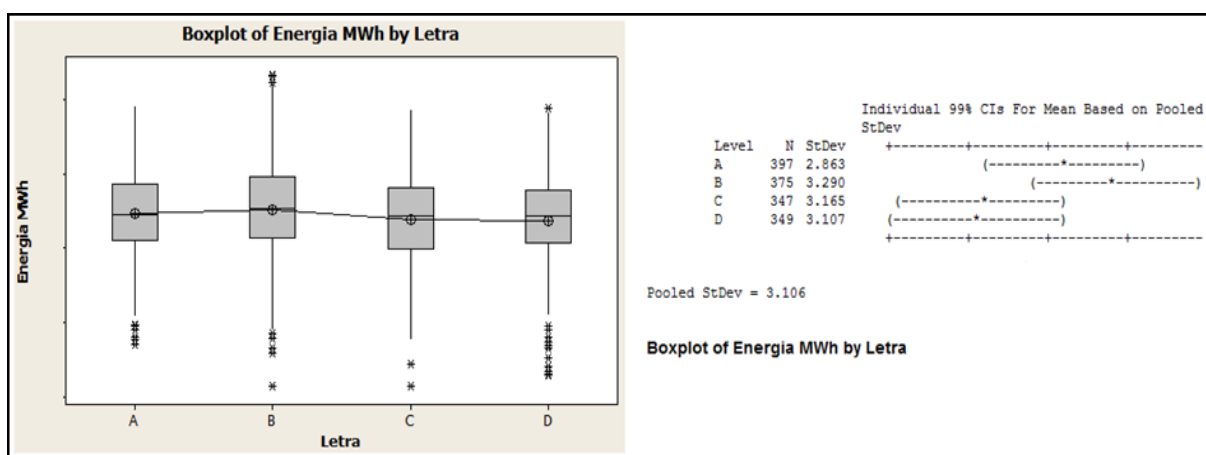


Figura 12. Box plot do consumo de energia comparando os 4 turnos de revezamento.

Quanto à análise do histórico, pelo gráfico da Figura 13 observa-se que os melhores resultados de *Power On* foram alcançados entre os meses de maio e setembro de 2011 (Cenário 1 – Tabela 1), onde se trabalhou com vazão de 2.000 Nm³/h de oxigênio e Tap do transformador 15.

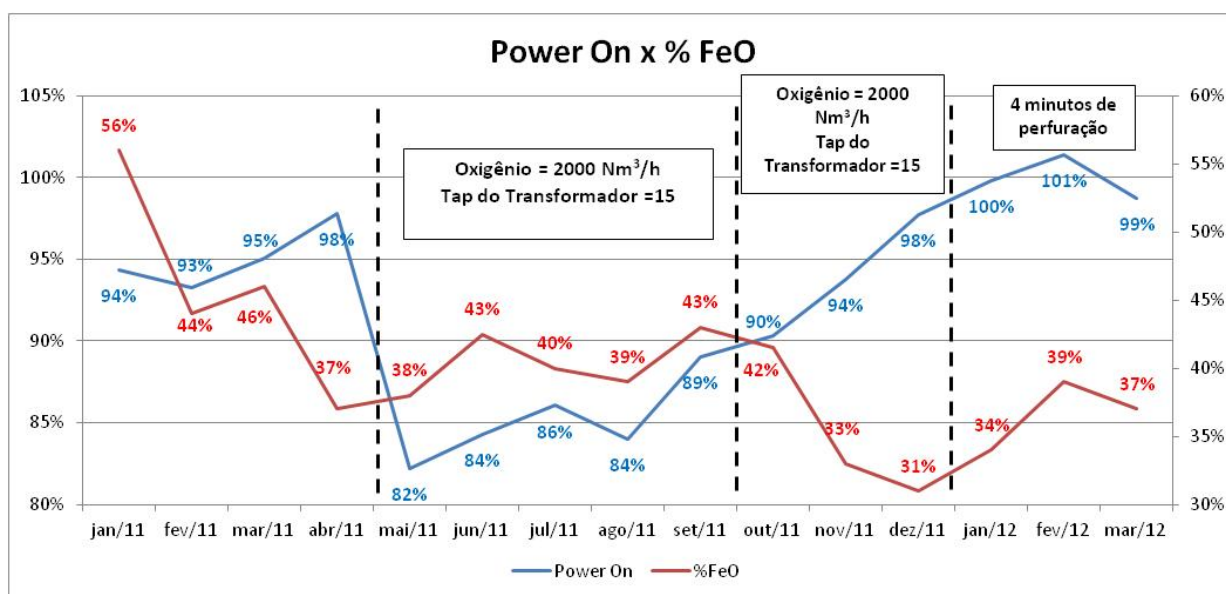


Figura 13. Evolução do Power On e %FeO.

Tabela 1. Tabela comparativa entre os cenários de processo do FEA (2012)

	Cenário 1	Cenário 2
Período	mai a set/11	out/11 a mar/12
Tap reator	4	4
TAP Bore In	5 (2 minutos)	5 (4 minutos)
TAP Melting	15/4 15/6	16/6 15/6
TAP Refining	10/6 08/6	11/6 10/6
Injetores	5 x 1800 e 2100	4 x 1600

No entanto, a partir de outubro de 2011 (Cenário 2 – Tabela 1) visando reduzir o %FeO e aumentar o rendimento metálico, ocorreu uma redução da vazão de oxigênio para 1.600 Nm³/h. Esta alteração de fato contribuiu para o aumento do rendimento metálico, porém foi crucial para o aumento do *Power On*, elevando em dezembro seu valor em 10,5% em relação ao menor valor obtido no ano. O problema foi agravado no início de 2012, pois devido aos eventos de furo na abóboda em janeiro, dobrou-se o tempo de perfuração (potência mais baixa).

2.3 Planejamento de Testes

A partir da identificação do problema e análise dos dados, decidimos propor alguns ajustes em caráter de testes para tentar reverter o cenário de maus resultados do FEA. Para isso, consultamos o Mapa de Processos do FEA e fizemos reuniões de Brainstorming com operadores, técnicos e especialistas com objetivo de identificarmos os parâmetros a serem testados e em quais níveis.

2.3.1 Mapa do processo

Na etapa de *brainstorming* foram levantados os fatores que potencialmente influenciam nos parâmetros elétricos e químicos do Forno Elétrico. Em seguida, aconteceu um processo de filtragem visando identificar os pontos que mais impactam, separados por cada etapa do processo do FEA, conforme a Figura 14.

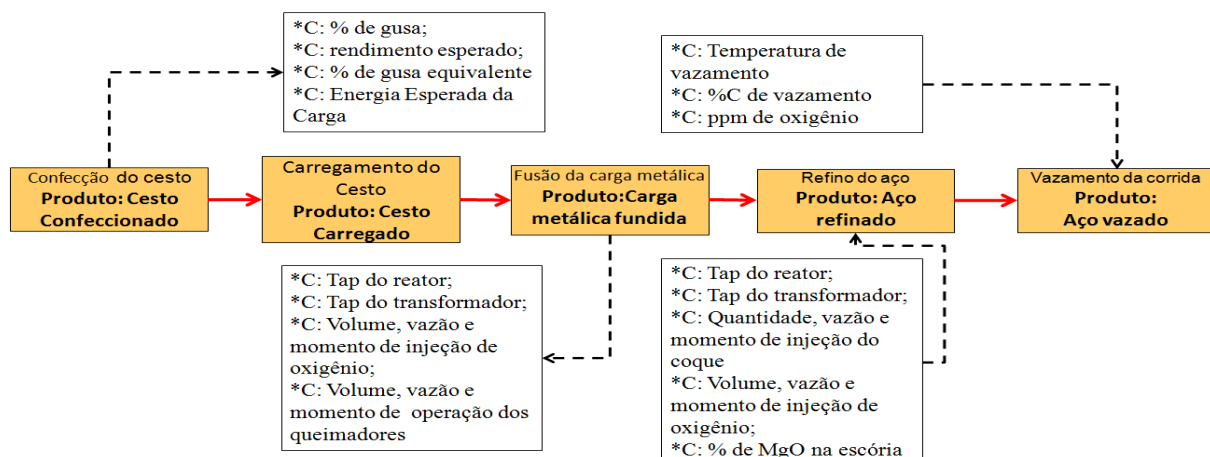


Figura 14. Mapa simplificado do processo do Forno Elétrico.

2.3.2 Programa de testes

Visando a melhoria no processo do FEA foram propostos os seguintes testes, que estão Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de testes

	Cenário 1	Cenário 2	Teste 1	Teste 2
Período	mai a set/11	out/11 a mar/12	abr a jun/12	jul/12 a out/12
Tap reator	4	4	2	2
TAP Bore In	5 (2 minutos)	5 (4 minutos)	11 (2 minutos)	5 (1 minutos)
TAP Melting	15/4 15/6	16/6 15/6	13/6 14/6	Tap 12/6 13/6
TAP Refinishing	10/6 08/6	11/6 10/6	11/6,	11/06,
Injetores	5 x 1800 a 2100	4 x 1600	4 x 1800	5 x 1800 a 2200

2.3.2.1 Teste 1

- *Tap Reator* – Devido à falha no SVC houve uma redução na tensão do primário, o que causa uma queda de potência no FEA. Como o *tap* do reator 2 possui menor reatância que o 4, ocorre uma compensação;
- *Tap Bore In* – Para obter maior Potência Ativa Média, aumentamos o *Tap* do *Bore In* de 5 para 11. O *tap* 11 possui fator de potência 0,75 (dentro do que as bibliografias indicam) e possui a maior corrente entre os 17 *taps* disponíveis;
- *Tap Melting* – redução do *Tap* 16 e 15 para *Tap* 13 e 14 na etapa de fusão (*melting*). A prática sem SVC e com reator no *tap* 2 mostra determinada instabilidade no arco utilizando *taps* 15 e 16. Dessa forma, foi proposto trabalhar com *taps* 13 e 14 que tem menor fator de potência e tendem a ser mais estáveis e mais eficientes;
- *Tap refinishing* – mesmo que os *taps* 10 e 11 tenham a mesma corrente, o *tap* 11 é mais indicado porque possui maior potência; e
- Injetores – No intuito de acelerar o processo, foi proposto operar com 5 injetoras a 1.800 Nm³/h. Embora os injetores possam atingir 2.200 Nm³/h, foi decidido aumentar a vazão em etapas devido aos riscos de super oxidação e rebotes de oxigênio.

2.3.2.2 Teste 2

- *Tap Bore In* – Devido às ocorrências de furos de abóbada por falhas de aterramento, por segurança operacional optou-se por iniciar o *Tap* de *Bore In* com *Tap* 5 durante 1 minuto e em seguida entraria o *tap* 11 por mais 1 minuto. Essa ação busca reduzir o comprimento de arco durante o início da perfuração;
- *Tap Melting* – foi proposta nova redução para os *taps* 13 e 12 para reduzir ainda mais o fator de potência visando aumentar estabilidade e eficiência;
- *Tap refinishing* – proposta de estender o *tap* 13 até a metade do refino visando aumentar a potência, pois a escória tem espumação suficiente para cobrir o arco. A outra parte do refino continuaria com *tap* 11;
- Injetores – No intuito de acelerar ainda mais o processo, decidiu-se aumentar a vazão das injetoras de 1.800 para 2.200 Nm³/h (maior vazão, maior velocidade, maior eficiência).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No teste 1, a utilização do *Tap* do Reator 2 com a redução do tempo de *Bore In* foram eficientes para o aumento da potência do FEA em 5,26%, ainda que tenha ocorrido a redução do *tap* do transformador. Este aumento de potência somado ao aumento da vazão do oxigênio justificam a redução do POn em 14,18% em relação aos 3 primeiros meses de 2012. Vale ressaltar que este aumento de vazão não comprometeu a oxidação do FEA, inclusive houve redução em 6% de FeO. Quanto ao consumo de energia, houve uma pequena redução 2,55%, o que era esperado já que houve aumento da Potência do FEA.

Com relação ao teste 2, com a redução do *tap* do transformador a potência do FEA foi reduzida em 3,91%, quando comparado ao teste 1. No entanto, a menor potência não impediu a redução do *Power On* em mais 3,54%, já que também ocorreu um aumento na vazão de oxigênio. Porém, o ponto mais expressivo do teste é a redução em mais 9,13% de energia, resultado conseguido através da redução do *Power On* e da Potência simultaneamente. Quanto ao % FeO, houve aumento em 2% comparado ao teste 1. Os resultados dos testes 1 e 2 podem ser vistos na Figura 15.

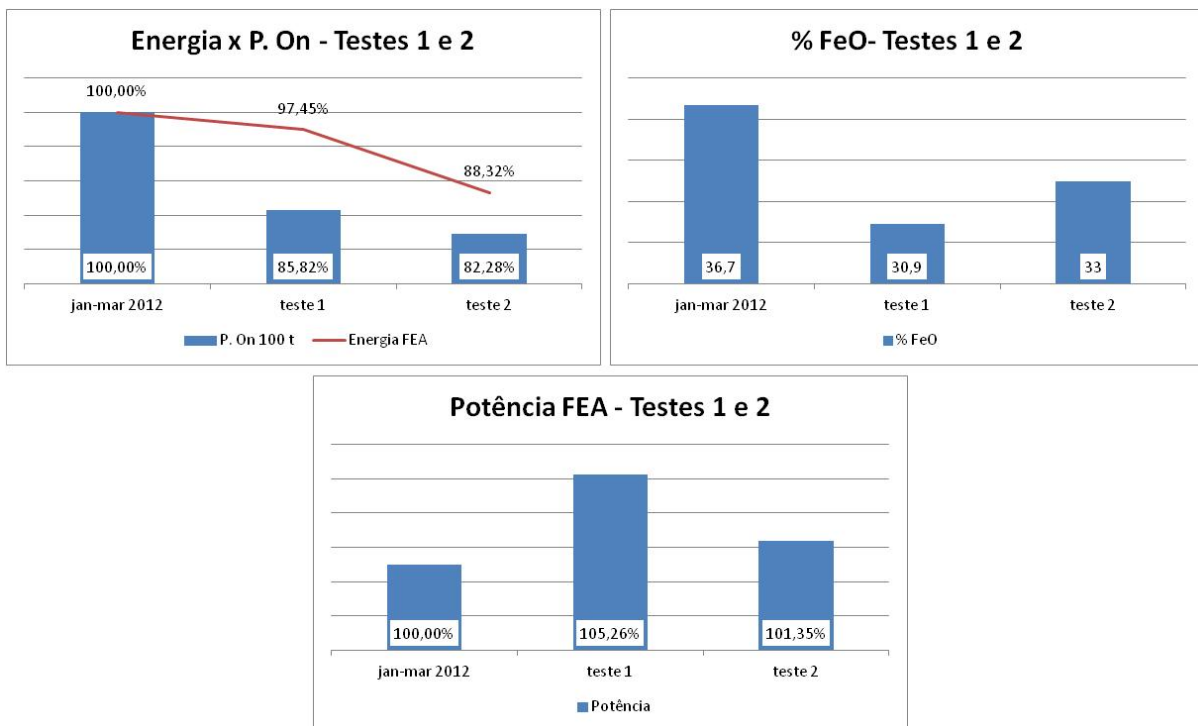


Figura 15. Comparação entre resultados de janeiro a março de 2012, teste 1 e teste 2.

Com relação ao consumo de gases, a melhoria na fusão devido à redução do fator de potência (através da diminuição do *tap* do transformador) e do aumento da potência do FEA (alteração no *tap* do reator), possibilitou trabalhar com menos tempo com os queimadores, contribuindo diretamente para a queda no consumo de gás natural. Além disso, com a redução do *Power On*, mesmo com vazões maiores de oxigênio, foi possível reduzir o consumo de oxigênio.

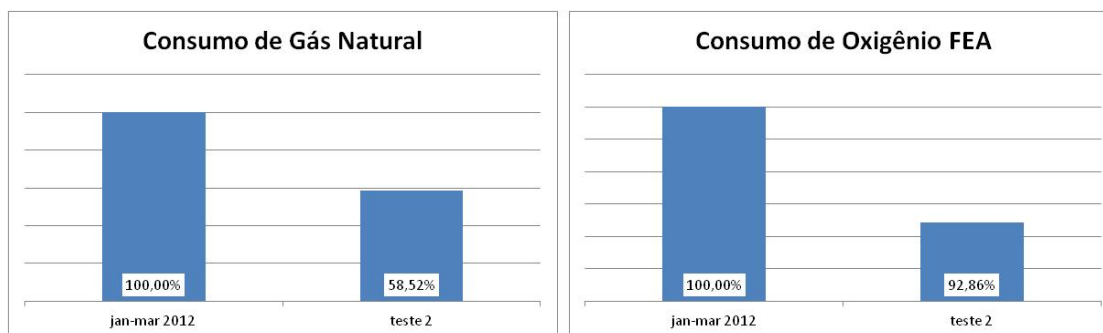


Figura 16. Comparação entre resultados de janeiro a março e teste 2.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados fica claro o sucesso do projeto, tendo impacto em sustentabilidade, produtividade e rendimento metálico. Sobre a regulagem do FEA ficam as seguintes conclusões:

- A redução do *tap* do reator 4 para 2 foi eficiente para disponibilizar mais potência ao FEA e compensar a ausência do SVC. Inclusive, é necessário realizar novos estudos para verificar a possibilidade de nova redução para o *tap* 1.
- O êxito na utilização dos *taps* 12 e 13 mostra a importância de se trabalhar com menores fatores de potência na fusão. No entanto, novos testes aumentando o *tap* do transformador no fim da etapa de fusão visando dar maior potência e velocidade ao FEA são necessários.
- A redução no tempo de *Bore In* foi importante para o aumento da potência média, sem comprometer a integridade da abóboda. Isso só foi possível com a utilização do *tap* 11, que tem maior corrente e tende a ter maior velocidade de perfuração.
- A utilização de maiores vazões de oxigênio foi fundamental para manter o *Power On* baixo, mesmo com a redução da potência do FEA (*taps* 12 e 13). A combinação de redução de potência média com aumento da energia química foi a chave para o significativo resultado de consumo de energia elétrica.
- O aumento da vazão de oxigênio não causa super oxidação no FEA, inclusive a injeção total foi reduzida. Isso mostra que o que contribui para a oxidação do forno é a quantidade total injetada e não a vazão.
- A redução do consumo de gás natural só foi possível devido a melhoria na fusão do FEA (*taps* 12 e 13). No entanto, trabalhos devem ser feitos para aumentar a potência do queimador em 42,85%, dessa forma o alcance do queimador seria maior e tenderia a melhorar ainda mais a fusão.

REFERÊNCIAS

- 1 J. Szekely, G. Trapaga, Sthal und Eisen, Vol. 114, 1994, N. 9 p. 43-45
- 2 CANDIDO, M. Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco.. 2008. 151 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia da Energia e Automações Elétricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001
- 3 JACCARD, L.R. Reatância indutiva do circuito do forno a arco e aplicação de reatores em série. In: Seminário de Aciaria, 39, 2008, Curitiba. *Anais*. São Paulo, 2001.
- 4 UCAR. *Electric Arc Furnace Digest*. Estados Unidos: UCAR, 2001. 31p.
- 5 ALLEMAND, B.,CHAMPINOT, C. Theoretical and experimental study of supersonic oxygen jets. Industrial application in EAF. *Revue de Métallurgie*, 98, p 571-587. 2001.