

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO¹

Emanuel Villanova²
Cássio Roberto Rocha³
Daniel Seixas Breda⁴
Poliana Cristina Araújo⁵
Rivelino de Assis Carvalho⁶
Gabrielly Cristine de Matos Silva⁷
Pedro Rodrigues Soares⁸

Resumo

O forno elétrico a arco nas aciarias de usinas siderúrgicas semi-integradas é o hoje o equipamento mais utilizado pela sua competitividade. Sua principal fonte de energia, a eletricidade, é um indicador chave no custo de transformação do aço e é visado quando analisadas variáveis de processo como potência média do forno e power on. No entanto o balanço energético do forno é algo complexo, e em função disso, algumas variáveis-chaves podem não ser analisadas com a devida atenção. Este trabalho procura compreender as variáveis-chaves que influenciam no comportamento energético do forno e qual é a sua contribuição para o rendimento energético.

Palavras-chave: Forno elétrico a arco; Eficiência energética; Energia; Eletricidade.

ANALYSIS OF AN ENERGETIC BEHAVIOR OF AN ELECTRIC ARC FURNACE

Abstract

The electric arc furnace in meltshops of semi-integrated steel mills is now the equipment most used because of its competitiveness. Its main source of energy, electricity is a key indicator for the cost of steel processing and is targeted when analyzed process variables such as average power and power on time of the furnace. However, the energy balance of the furnace is complex, and as a result, some key variables cannot be analyzed with due attention. This paper seeks to understand the key variables that influence the energy behavior of the furnace and what is their contribution to energy efficiency.

Key words: Electric arc furnace; Energy efficiency; Energy; Electricity.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Gerente de Aciaria, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil

³ Consultor de Aciaria, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil

⁴ Engenheiro de Manutenção, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, Rio de Janeiro, Brasil

⁵ Engenheira de Processo, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, RJ, Brasil

⁶ Analista de Custos, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, RJ, Brasil

⁷ Técnica Administrativa, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, RJ, Brasil.

⁸ Suporte Técnico, Votorantim Siderurgia, Barra Mansa, RJ, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda devido ao crescimento industrial do país temos convivido com frequentes aumentos do preço da energia elétrica, este insumo tem se tornado cada vez mais, um item de atenção para as indústrias brasileiras. Paralelo a isto, a entrada de produtos importados no país, com preços muito competitivos, faz com que cada vez mais se busque a redução de custos, intensificando ainda mais a preocupação das empresas com o consumo de energia elétrica.

Um setor que vem experimentando esta realidade de forma intensa é o setor siderúrgico. No caso das usinas semi-integradas, o foco tem se voltado cada vez mais para o forno elétrico a arco, pois o equipamento demanda seu insumo mais representativo, a energia elétrica. Porém no tocante ao assunto energia a em forno a arco, os indicadores comumente utilizados são: consumo de energia elétrica, tempo de forno ligado e potência média do forno. Todavia o forno é um equipamento que apresenta um equilíbrio de energias, elétrica e química, e parcelas significativas desta energia são transmitidas à escória, à água de refrigeração dos painéis, aos carburantes da carga, ao sistema de despoeiramento e outras pequenas parcelas

O comportamento energético do forno elétrico a arco não é algo trivial. Este tema é abordado em diversos trabalhos técnicos de níveis elevados. Sua análise com maior nível de detalhamento demanda modelos matemáticos complexos e recursos computacionais.

Este trabalho teve por objetivo obter um conhecimento básico do balanço de energia do forno, identificar qual é a parcela da energia efetivamente transferida ao aço e a mensuração da representatividade destas variáveis.

O desafio deste trabalho é a motivação de estudos voltados à redução do consumo de energia elétrica nos fornos elétricos, através de análises das variáveis citadas, sem impactos negativos ao processo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Energia elétrica – Análise Teórica

Um ponto de partida do trabalho foi a necessidade de conhecimento da energia elétrica necessária para fusão da sucata carregada no forno. Para isto foi tomado como referência um estudo realizado previamente que determinou os valores necessários de energia elétrica para fusão de uma tonelada de cada tipo de sucata. Estes valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Planilha de energias teóricas para cada tipo de sucata

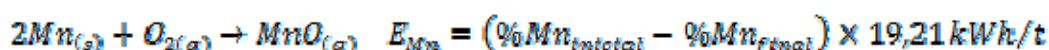
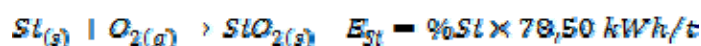
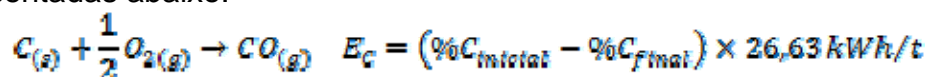
Energia Elétrica Teórica (kWh/t)	Sucata
342,1	Gusa sólido
423,9	Sucata de gusa miuda
323,6	Ferro Fundido
401,1	Estamparia pura
423,9	Sucata Mista
514,9	Cavaco de aço
514,9	Tesourada (nova)
514,9	Pacote Misto (novo)
423,9	Pesada de Industria
423,9	Fundo de Baia
514,9	Tesourada
370,8	Borra de aço comprada
401,1	Pacote estamparia pura
514,9	Pacote Misto
423,9	Shredder comprada
371,6	Corte Dobra
423,9	Sucata carga peso (pronto uso)
401,1	Shredder comprada de estamparia
412,9	Shredder própria da Usina (SDU)
370,8	Sucata interna pesada pronto uso
370,8	Sucata interna pesada para corte
370,8	Sucata interna leve para corte
456,7	Borra de aço interno do FEA
8,2	Cal Calcítica
370,8	Sucata Corte e Dobra
9,5	Cal Dolomítica
25	Coque Granulado
463	Carepa
456,7	Retorno PH
370,8	Retorno Interno
370,8	Retorno Interno Arame
370,8	Retorno Tarugo
401,1	Sucata Estamparia Shreddada
423,9	Shredder

Conhecidos estes valores, para que seja levantado um consumo de energia previsto de um determinado carregamento do forno, basta realizar o somatório do produto destas energias pelo percentual de cada tipo de sucata no carregamento.

2.2 Energia química – Análise Teórica

Como comentado anteriormente, o forno elétrico a arco tem como fontes de energia, parcelas elétrica e química. Elétrica proveniente do arco voltaico de alta intensidade formado entre os eletrodos de grafite, e química proveniente de reações entre agentes químicos injetados através de combustores.

Dentre os agentes reagentes, podem ser citados como principais ⁽¹⁾: Oxigênio, Carbono, Silício e Manganês. Suas reações e sua parcela de geração de energia são apresentadas abaixo:



Para um cálculo simplificado da energia química gerada no forno, pode ser feita uma análise dedicada aos combustores e injetores de oxigênio supersônico, onde a partir de cálculos estequiométricos se obtém o seguinte:

Tabela 2 – Energia química proveniente dos gases dos combustores

Gás (1Nm ³)	kWh/t
Oxigênio (reação)	3,6
Gás Natural	10

Logo:

$$E_{\text{energia química}} (\text{kWh/t}) = 10 \times \text{Volume GN} + 3,6 \times \text{Volume } O_{2(\text{reação})}$$

Sendo o oxigênio de reação correspondente ao volume de oxigênio total subtraído do volume de oxigênio que sofre combustão com o gás natural, ou seja:

$$O_{2(\text{reação})} = O_{2(\text{total})} - O_{2(\text{combustão})}$$

$$O_{2(\text{combustão})} = 2,1 \times GN$$

2.3 Energia útil – Análise Teórica

A energia necessária para fusão do aço e elevação da temperatura deste ao valor determinado para vazamento, pode ser determinada pela equação:

$$E_{\text{aço}} (\text{kWh/t}) = \frac{\text{volume}_{\text{aço}} (\text{t}) \times 0,221 (\text{kWh/t}^\circ\text{C}) \times \text{temperatura}_{\text{aço}} (\text{°C})}{\text{Peso Médio (t)}}$$

onde: 0,221 kWh/t°C é a energia necessária para elevação em 1°C de 1 tonelada de aço, ou seja, calor específico do aço⁽¹⁾.

2.4 Energia na escória – Análise Teórica

Para se calcular a energia dissipada na escória, um cálculo análogo ao anterior pode ser realizado, porém agora considerando o calor específico diferente ao do aço, sendo este 0,28 kWh/t°C ⁽¹⁾, visto que a composição química da escória é diferente em relação à do aço e demanda um valor superior de energia para elevação de sua temperatura. Com isso a equação fica:

$$E_{esc\acute{o}rta} (kWh/t) = \frac{\text{volume}_{esc\acute{o}rta} (t) \times 0,28(kWh/t^{\circ}C) \times \text{temperatura}_{esc\acute{o}rta} (^{\circ}C)}{\text{Peso Médio} (t)}$$

Em média de medições realizadas, a temperatura da escória no momento do vazamento é cerca de 70°C superior a temperatura do aço.

2.5 Perdas de Processo

Os instantes em que o forno tem sua operação interrompida e os instantes em que este é aberto para carregamento, ou seja, os tempos chamados de *Power off*, representam perdas de energia para o forno. Para analisar estas perdas de energia, foram analisadas 430 corridas do forno à arco 1 da aciaria de Barra Mansa, divididas em corridas de 2 e 3 carregamentos, e comparadas aos cálculos de energia teórica da sucata (item 1.1).

As corridas analisadas foram classificadas de acordo com o número de carregamentos com base em intervalos de *Power off* de 5 min, sendo os intervalos determinados:

- de 1 a 5 min
- de 5 a 10 min
- de 10 a 15 min
- de 15 a 20 min
- de 20 a 25 min
- de 25 a 30 min.

Após classificadas, os valores de consumo de energia elétrica destas corridas foram comparados aos valores esperados com base nas sucatas carregadas, e assim foi obtida uma tabela de deltas entre o valor real e o valor esperado. Para uma primeira análise da tabela, já foi possível concluir que a energia média perdida devido ao acréscimo de mais um carregamento à corrida é da ordem de 15,73 kWh/t.

Em seguida, quando plotada o delta de energia em função dos tempos de *Power off*, a seguinte curva é obtida (Figura 1), cujo a equação exponencial que rege sua tendência é dada por $10,094 \times \text{Power_Off}^{-1,907}$. Logo integrando a curva obtemos que:

$$\text{Energia Perdida por Power off (kWh/t)} = \int 10,094 \times \text{Power_Off}^{-1,907}$$

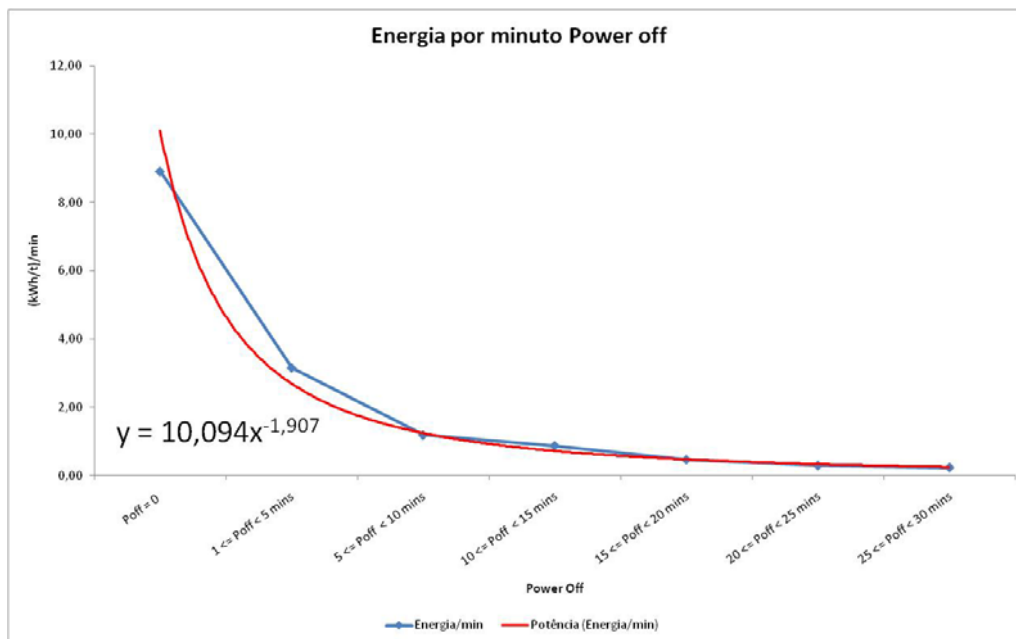


Figura 1 – Perda de energia em função de tempo Power off.

2.6 Perdas de Painéis

Considerando o calor específico da água como 1 cal/g°C, através de uma conversão de valores seriam necessários 0,066 kWh de energia para aquecer em 1 grau Celsius 1 metro cúbico de água. Partindo deste raciocínio podemos realizar por meio de um cálculo simples de calor latente, uma análise estimada de quanto de energia é despendida no forno para refrigeração dos painéis, a partir da vazão de refrigeração destes, e do delta entre temperatura da água de chegada nos painéis e da temperatura da água de saída.

2.7 Energia de Dissolução do Coque

O coque é um dos materiais carburantes mais comuns que são carregados no forno e que possui um papel fundamental para geração de energia química através da reação com o oxigênio injetado. No entanto para que essa reação aconteça, é necessário que este se dissolva no banho. Para isso é demandado um valor de energia.⁽¹⁾ A contribuição térmica negativa do coque é da ordem de -60°C para cada 1% de coque carregado no forno. Logo utilizando da equação mencionada no item 1.3, podemos calcular a energia perdida no aço em função da dissolução do coque.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar os cálculos anteriormente mencionados através dos valores utilizados no processo do forno elétrico a arco 1 da aciaria de Barra Mansa, foi possível observar a parcela percentual consumida por cada variável do processo comentada, chegando a um valor de energia útil utilizada pelo aço de somente 62,49%.

Atribuímos a parcela restante ao despoeiramento e pequenas perdas, como sonoras, luminosas, magnéticas, indutivas, entre outras. Lembrando que as energias consideradas neste trabalho, são somente as energias contidas no interior de um forno a arco que não possui tecnologia de pós-combustão. Demais energias surgem

também no interior da câmara de combustão, proveniente da reação exotérmica do monóxido de carbono, energia esta que motivou o projeto Cohen-Steel.

Apesar de ser esperado que o valor fosse relativamente baixo, calculamos o valor das perdas elétricas do forno, ou seja, as perdas dissipadas em função da impedância do circuito de alimentação. Para isso, utilizamos o valor de corrente utilizado em cada tap do programa de potência, bem como o tempo de permanência em cada tap. Foi encontrado o valor irrisório de 0,003%.

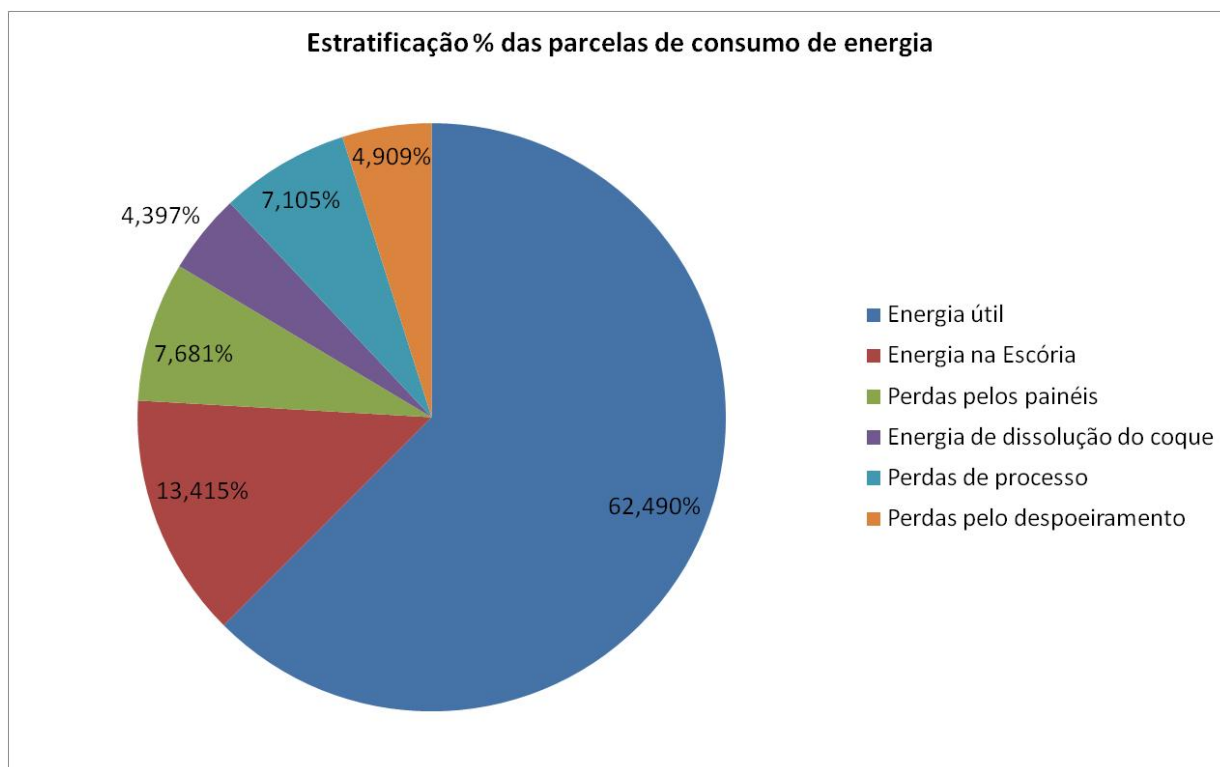


Figura 2 – Estratificação % das parcelas de consumo de energia do FEA 1.

4 CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível compreender que cerca de 62,5% da energia total de entrada do forno é utilizada para fundir a sucata e elevar esta à temperatura de vazamento.

Em seguida 13,4% da energia são consumidas na escória, o que denota uma importância elevada no controle do volume de escória gerada no forno e das temperaturas de vazamento, visto que a energia consumida pela escória está diretamente relacionada a estas duas variáveis. Apesar de não estar contemplado no cálculo também é importante ressaltar a importância do controle da basicidade da escória. Além dos aspectos metalúrgicos, este também tem sua importância sob uma análise energética, pois este índice contribui para o controle da espumação da escória, que está diretamente relacionado à condução da energia do arco ao banho.

A parcela de 7,7% ressaltou a importância do volume de água utilizado nos painéis refrigerados do forno. Considerando esta parcela de consumo, torna-se interessante operar o forno utilizando a máxima capacidade das torres de refrigeração na redução da temperatura das águas atentando para o limite térmico dos painéis prevenindo a danificação dos mesmos.

Por fim, o cálculo utilizado para as perdas de processo que resultou na parcela 7,1% ressaltou a importância da resposta rápida na atuação em pequenas

paradas de processo uma vez que a taxa exponencial de perda térmica nestas situações é mais representativa nos minutos iniciais da parada.

As demais causas dos 10,3% de energia restante não têm sua importância reduzida, no entanto, é mais interessante serem analisadas sob sua contribuição para o processo do forno do que sob o rendimento energético, uma vez que seu impacto é pequeno comparado às demais causas.

Agradecimentos

Agradecemos a todos os funcionários da aciaria da Votorantim Siderurgia, unidade de Barra Mansa que contribuíram para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CARVALHO, J. L. R.; ASSIS P.S.; FIGUEIRA, R.M.; CAMILO, R.D.; CAMPOS, V.F., Dados termodinâmicos para metalurgistas, **Departamento de engenharia metalúrgica da UFMG**, BELO HORIZONTE, 1977.