

REDUÇÃO DO CONSUMO DE ELETRODO DE GRAFITE ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE POTÊNCIA DO FEA DA SINOBRAS*

Neiclésio Nunes Ibiapina¹
Gerson Ceslau Rusky²
Geraldo Ferreira³
Marcus Cardoso⁴

Resumo

O forno elétrico a arco (FEA) é um equipamento utilizado para fabricação de aço e o seu processo consiste em fundir e aquecer a carga metálica utilizando energia elétrica, através da formação do arco elétrico entre os eletrodos de grafite e a carga, e as reações químicas. Com a acirrada competitividade do mercado, reduzir os custos da produção do aço é fundamental e como os eletrodos de grafite possuem um significativo impacto nesses custos, diminuir o consumo específico desse material impactará diretamente na redução dos custos operacionais. Este trabalho apresenta os resultados alcançados na redução do consumo específico de eletrodo de grafite do FEA da SINOBRAS. Para isso, foi empregada uma metodologia de resolução de problemas junto com um sistema de monitoramento de dados do FEA com o objetivo de otimizar o programa de potência.

Palavras-chave: Forno elétrico a arco; Eletrodo de grafite; Regulagem elétrica; Programa de potência.

REDUCTION ON GRAPHITE ELECTRODES SPECIFIC CONSUMPTION USING POWER PROGRAM OPTIMIZATION AT SINOBRAS

Abstract

The electric arc furnace (EAF) is an equipment used to make steel which consists on melting the scrap using electrical power, through the emission of electric arc among the graphite electrodes and metallic charge, and others chemical reactions. Competitiveness among steel producers had increased over the past years, forcing cost reductions and since graphite electrodes contribute to cost, its reduction impacts on variable cost of the meltshop. This paper presents the results obtained in the reduction of the specific consumption of graphite electrode of EAF at SINOBRAS. A resolution methodology was used along with an EAF data monitoring system in order to optimize the power program.

Keywords: Electric arc furnace; Graphite electrode; Electrical regulation; Power program.

¹ Engenheiro de Materiais, Engenheiro de Processos da Aciaria da Siderúrgica Norte Brasil - Sinobras, Marabá, Pará, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Gerente da Aciaria da Siderúrgica Norte Brasil - Sinobras, Marabá, Pará, Brasil.

³ Engenheiro Químico, Diretor de Vendas da GrafTech Brasil, São Paulo, Brasil.

⁴ Engenheiro Eletricista, Engenheiro de Assistência Técnica da GrafTech Brasil, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Forno Elétrico a Arco (FEA)

O forno elétrico a arco (FEA) é o segundo dos dois principais processos de produção de aço. Se destaca por ser a maior rota de produção para a reciclagem de sucata de aço.

Existem, basicamente, dois diferentes tipos de fornos elétricos a arco que são os de corrente contínua e os fornos de corrente alternada. Esses equipamentos são extremamente versáteis e uma prova disso é a possibilidade de serem utilizados para produzir desde aços para construção civil, aços planos e especiais.

O funcionamento do FEA (Figura 1), para produção de aço é de fácil compreensão e na SINOBRAS envolve as etapas de carregamento, após a abertura da tampa do forno chamada de abóboda, de sucata metálica e gusa líquido e quando a abóboda é fechada o forno é ligado e inicia a etapa de fusão. É um equipamento que possui como principais características de operação o uso de correntes elevadas e tensões baixas, estas formam os arcos elétricos e promovem o processo de transferir calor para carga metálica [1]. O processo também, durante a fusão e refino, conta com a energia química que é obtida através das reações de oxidação de elementos químicos que estão presentes na carga metálica, tais como silício, carbono, manganês, ferro entre outros, além do carbono, combustíveis adicionados e gases como hidrogênio e monóxido de carbono (CO). Após o banho atingir a temperatura e composição especificada, o aço líquido é vazado para uma panela (Figura 2), equipamento com carcaça metálica e revestida de material refratário, que seguirá para o refino secundário no Forno Panela e no FEA se inicia novamente uma nova corrida.



Figura 1. Forno elétrico da SINOBRAS. panela.



Figura 2. Vazamento de aço do FEA para panela.

1.2 Controle de Potência Elétrica

O nível de potência inserida no FEA depende principalmente da corrente elétrica utilizada, dos TAPs de tensão escolhidos, assim como a configuração do reator quando disponível. Os modernos fornos a arco são equipados com reguladores de eletrodos que funcionam de forma dinâmica para alcançar e manter valores de corrente e tensão de arco. O regulador de eletrodo (Figura 3), controla o movimento das colunas que suportam os eletrodos. Este controle é baseado na diferença dos sinais monitorados que são comparados com valores de referência e, com base no erro obtido, o regulador envia sinais para o sistema hidráulico de controle das

colunas para realizar o movimento vertical para cima ou para baixo de forma dinâmica.

É possível configurar diferentes tipos de programas no regulador, isso depende do tipo e qualidade de carga metálica e dos objetivos de produtividade e custos desejados.

As variáveis que são diretamente dependentes do ajuste do programa de potência são o tempo de forno ligado (Power On), o consumo de energia elétrica, o consumo de eletrodos, a temperatura dos painéis refrigerados do FEA e o desgaste do revestimento refratário. A tensão e corrente devem ser ajustadas para que a potência seja aplicada de forma eficiente, reduzindo assim as perdas de energia.

Os parâmetros de trabalho são ajustados pelo responsável pelo controle do processo para obter melhores resultados de potência, rendimento, estabilidade, consumo de eletrodo etc.



Figura 3. Regulador de eletrodos.

1.3 Eletrodo de Grafite

O coque agulha é a matéria prima utilizada para fabricação do eletrodo de grafite, e devido ao aumento acentuado da procura deste para fabricação de baterias de íons de lítio, ocorreu um aumento significativo do preço e conseqüentemente houve uma disparada nos preços dos eletrodos de grafite.

Como os eletrodos são os itens de grande importância na operação dos FEA's, logo otimizar seu consumo caracteriza uma questão de sobrevivências para as siderúrgicas.

1.4 Otimização do Programa de Potência

Para otimização do programa de potência de um FEA, é necessário observar os dados fornecidos pelo sistema de monitoramento e com conhecimento do equipamento, promover ajustes necessários e acompanhar os resultados obtidos após sucessivas corridas para validar as alterações. Deve-se observar o

comportamento dos painéis em relação a temperatura, assim como o desgaste do revestimento refratário, pois de acordo com Jaccard [2] a principal limitação para o aumento da tensão de arco é a erosão dos refratários e em casos extremos ocorre o superaquecimento dos painéis refrigerados. O índice de erosão de Schwabe [3] mostra também que o desgaste é proporcional a potência do arco conforme a equação (Equação 1) [3].

$$I. e. = V_a \times P_a / B^2 \quad (1)$$

Onde:

V_a = a tensão do arco;

P_a = a potência do arco;

B = a distância entre a face do eletrodo e a parede.

Quando o objetivo é reduzir o consumo de eletrodo, alterações nos parâmetros do regulador podem ter grande impacto no consumo de ponta do eletrodo, pois este ocorre de acordo com a configuração empregada em termos de tensões e correntes escolhidas ao longo da corrida.

De acordo com Jaccard [4], excluindo as quebras, o consumo de eletrodo ocorre: no sentido vertical, pelo efeito do arco na ponta e no sentido horizontal, pelo efeito da oxidação.

As equações básicas para o consumo de ponta e lateral de eletrodo de grafite já foram bem fundamentadas por Potey [5], onde ele relaciona a taxa de consumo de ponta com o quadrado da corrente conforme (Equação 2) [5]:

$$\frac{Kg}{t} \text{ ponta} = \frac{K \cdot kA^2 \cdot POT}{PV} \quad (2)$$

Onde:

K : fator específico de taxa de consumo de ponta em $kg/kA^2 \cdot h$;

kA : corrente média;

POT : Power On time (tempo de forno ligado) em horas;

PV : peso vazado em toneladas.

E o para consumo lateral do eletrodo aplica a (Equação 3) [5]:

$$\frac{Kg}{t} \text{ lateral} = \frac{A \cdot \pi \cdot D \cdot Lox \cdot TTT}{PV} \quad (3)$$

Onde:

A : fator específico de taxa de consumo de ponta em $kg/m^2 \cdot h$;

D : diâmetro médio da parte oxidada da coluna do eletrodo em metro;

Lox : comprimento da porção oxidada da coluna do eletrodo em metro;

TTT : tap to tap time (tempo de processamento da corrida do FEA) em horas.

De acordo com (Equação 2), fica claro que a corrente utilizada possui impacto no consumo de ponta do eletrodo, logo a redução dessa corrente pode favorecer a redução da taxa de consumo, porém para uma mesma tensão, a redução de corrente provoca redução da potência e aumento da instabilidade de arco e de

acordo com estudos de Potey [5], este aumento provoca aumento da taxa de consumo de ponta, conforme pode ser visto na (Figura 4). Desta forma é necessário estudar e simular as configurações do programa de potência para se obter os melhores resultados possíveis.

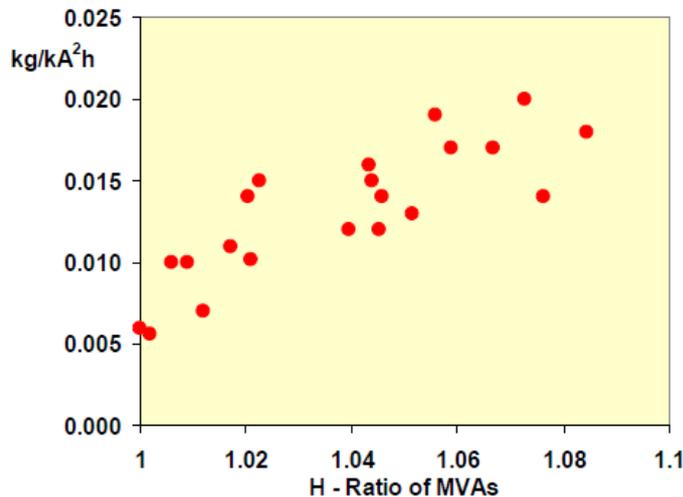


Figura 4. Taxa de consumo de ponta versus fator de harmônicos⁵

Os reguladores de eletrodo modernos oferecem diversos recursos para configurar os programas de potência conforme as necessidades do processo, tipos de carga e objetivos.

As principais formas de regulação são: impedância constante, tensão de arco constante, resistência de arco constante e em alguns sistemas mais modernos estão utilizando lógica Fuzzy. Cabe ao responsável pelo processo do FEA escolher a melhor opção para seus objetivos.

1.5 Monitoramento de dados

O sistema de monitoramento de dados é uma ferramenta de avaliação de forno elétrico a arco que permite os usuários gerenciar seus dados de operações de qualquer dispositivo habilitado para web conforme (Figura 5).

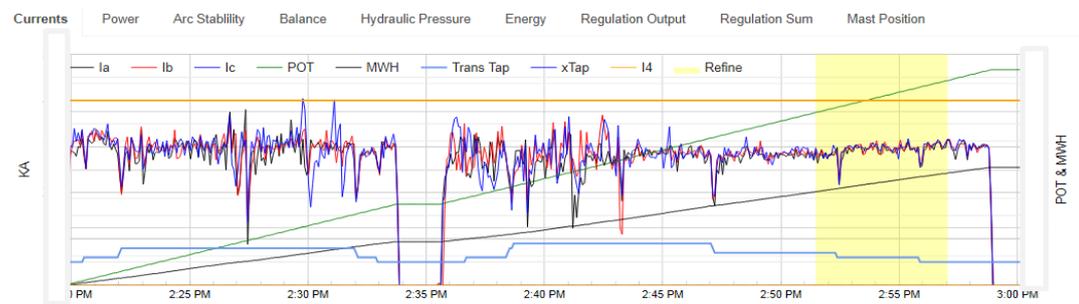


Figura 5. Perfil de corrida.

O sistema é patenteado e de propriedade da GrafTech Internacional sendo projetado para capturar os principais indicadores do forno elétrico para avaliação, análise e ação corretiva quando necessário. É uma importante ferramenta de diagnóstico que

usa testes estatísticos (Figura 6) e alertas por e-mail para capturar eventos significativos que afetam a eficiência da operação ou que possam provocar paradas de produção. A plataforma de hardware é independente e requer conexões aos transformadores e medição de potência do FEA existentes, plataformas PLC e uma conexão com a internet para o servidor remoto.

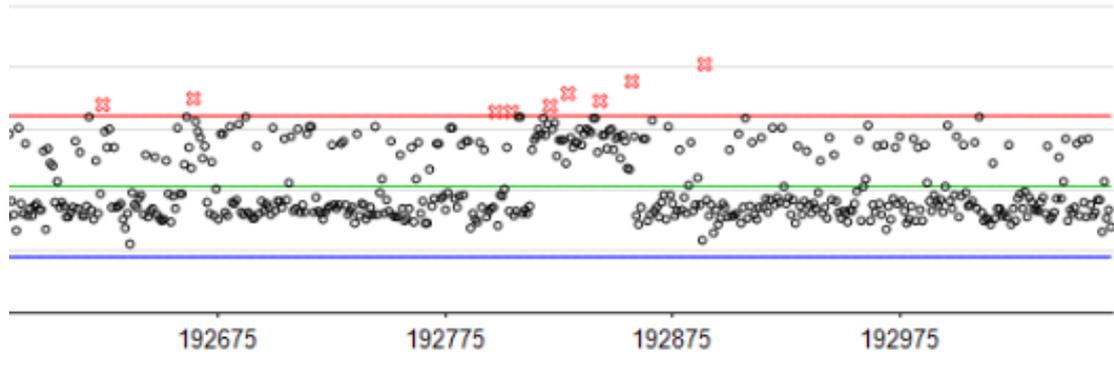


Figura 6. Teste estatístico SPC MWH.

Este trabalho mostra como foi, planejado, analisado e implementado o projeto com objetivo de redução do consumo específico de eletrodo de grafite no FEA da SINOBRAS, assim como os resultados alcançados.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Para desenvolvimento do trabalho foi utilizado o método DMAIC de resolução de problemas combinado com sucessivos ciclos PDCA (Figura 7). O período de definição, mensuração, análise do problema, implementação das soluções e padronização do processo compreendeu seis meses entre o ano de 2018 e 2019.



Figura 7. Etapas do PDCA e DMAIC.

2.1.1 Características do Forno

A (Tabela 1) possui os dados do forno elétrico a arco da SINOBRAS onde o trabalho foi realizado.

Tabela 1. Dados do Forno Elétrico da SINOBRAS.

Fabricante	BSE
Volume do forno	57 m ³
Capacidade do forno	44 t
Tipo de forno	EBT
Diâmetro dos eletrodos	18"
Peso vazado	40 t
Transformador	41,6/50 MVA
Tensão Máxima	1000 V

2.1.2 Simulação e testes de hipóteses

Na etapa de análise do problema, utilizando as equações fornecidas pelo modelo de Potey [5] que relacionam as variáveis que afetam o consumo de eletrodo, foi possível planejar, simular e testar diferentes configurações do programa de potência. Depois de cada simulação foram planejados os testes no FEA, coletados os dados e analisados estatisticamente seguindo o PDCA. A (Figura 8) mostra a ferramenta utilizada para simulação dos experimentos.

ELECTRODE CONSUMPTION MODEL - 2004

Ver. Aug 13, 2018				
Customer Name	SINOBRAS			SINOBRAS
Furnace id	FEA			FEA
Parameter	Input values			Unit
	Case#1	Case#2	Case#3	
Current Type	AC	AC	AC	AC - DC
Is it a Ladle Furnace?	No	No	No	Yes - No
Steel grade	Carbon	Carbon	Carbon	Stainless - Carbon
Number of electrode columns	3	3	3	Phase (s)
Electrode Dia	450	450	450	mm
Max electrode column length under the clamp	xx	xx	xx	mm
Tap to Tap (min)	xx	xx	xx	min
Heat size	40	40	40	t
Total Oxygen	xx	xx	xx	Nm 3t
Electrode oxidised length	xx	xx	xx	mm
Electrode tip diameter (measured)	xx	xx	xx	mm
Total power on time (min)	xx	xx	xx	min
Average phase current per heat	xx	xx	xx	kA
% DRHBI (continuously fed ONLY)	0	0	0	%
Flat bath process (Consteel...)	No	No	No	Yes - No
Arc stability factor - For AC EAFs only (Choose option 1 or 2 depending on information available) (Leave fields at "0" if not known)				
1. Harmonics measurements (H) from PAFA measurements.	xx	xx	xx	Ratio of MVA
2. Total Harmonics Distortion	xx	xx	xx	THD
Power on time for Vars < 120 Volts (input 0 if none)	xx	xx	xx	min
Average Vars for period with Vars < 120 Volts (input 0 if none)	xx	xx	xx	Volts
Forming EAF - Is tapping C < 0.05% and high FeO% in slag > 40%?	No	No	No	Yes - No

Figura 8. Simulação dos cenários para testes de hipóteses

No total foram simulados e testados sucessivamente cinco experimentos diferentes em que os resultados do experimento anterior forneciam base para os experimentos seguintes. As alterações foram realizadas na corrente, tensão e reatância, de acordo com a (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros alterados nos cinco experimentos.

Parâmetro	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5
Corrente	M	M	M	R	R
Tensão	A	A	A	M	M
Reatância	M	M	A	R	M

Legenda:

A = aumentada;

M = mantida;

TH = Teste de hipótese;

R = reduzida.

Após a conclusão dos experimentos, foram extraídos os dados das corridas que estavam registrados no sistema de monitoramento para realizar análise estatística que foi calculada através do teste *One-way ANOVA* conforme a (Figura 9), esse teste é utilizado para verificar se os resultados obtidos eram significativos ou aleatórios.

As principais variáveis observadas no FEA foram o consumo de eletrodo, o Power-On (tempo de forno ligado), o consumo de energia, Total Harmonic Distorsion (THD), desgaste de refratário e temperatura da água dos painéis refrigerados durante o refino.

One-way ANOVA: Antes; Depois

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0,07220	0,07220	25,48	0,002
Error	6	0,01700	0,00283		
Total	7	0,08920			

S = 0,05323 R-Sq = 80,94% R-Sq(adj) = 77,77%

Figura 9. Teste de hipótese "One-way ANOVA.

2.2 Resultados e discussão

Após a realização dos testes de hipóteses alcançamos os seguintes resultados para os itens analisados.

Com as alterações do programa de potência foram alcançadas reduções da corrente média em até 4,5% (TH 5) (Figura 10). Já com as alterações nos taps do transformador, ocorreu aumento de até 7,5% da tensão média em (TH 3, 4 e 5) conforme visto na (Figura 11).

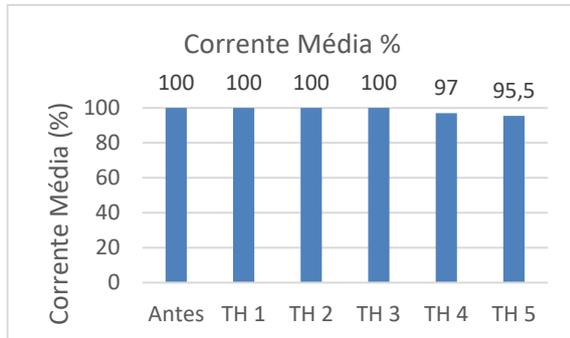


Figura 10. Resultados de corrente média.

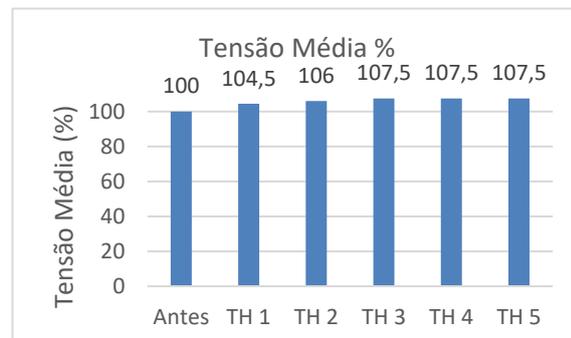


Figura 11. Resultados de tensão média.

O Power On, tempo de forno ligado, apresentou pequena redução em quatro dos cinco testes de hipóteses, (Figura 11). No teste de hipótese 3 (TH 3), quando foi alterado o tap do reator, foi observado aumento do Power On, isso provavelmente ocorreu devido ao aumento da reatância ter provocado queda de tensão e consequentemente redução da potência média.

O consumo de energia (Figura 12), apresentou pequenas variações, sendo que o melhor resultado ocorreu no (TH 2) com redução de 2% do consumo, houve também redução de 1% no consumo de energia no (TH 4) e (TH 5).

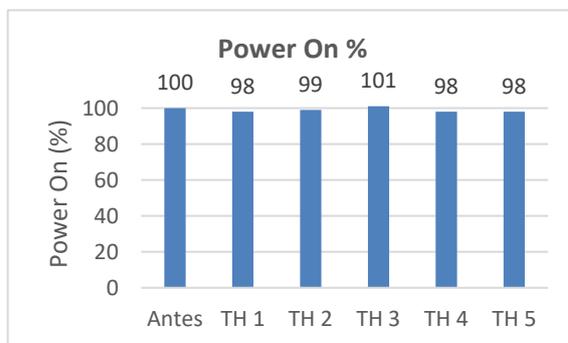


Figura 11. Resultados de Power On

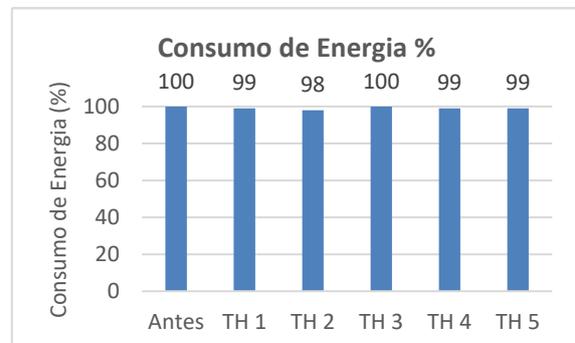


Figura 12. Resultados de consumo de energia.

Não houve alterações significativas nas temperaturas dos painéis refrigerados, (Figura 13), desta forma, podemos supor que as alterações com aumento da tensão não provocaram efeitos negativos nos painéis do FEA. Já a Figura 14, mostra que em todos os testes de hipóteses implicaram no aumento do THD, sendo o (TH 2) o que apresentou maior valor com aumento de 6%, porém, esse aumento não implicou em prejuízo significativo para aumento da instabilidade ou aumento de consumo de eletrodo.

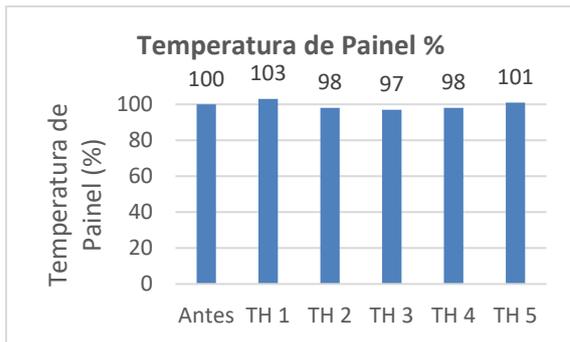


Figura 13. Resultados da temp. de painel.

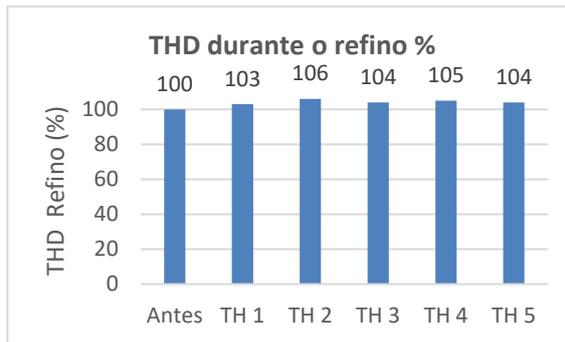


Figura 14. Resultados de THD durante o refino.

Os valores de índice de refratariedade (Figura 15), apresentaram um aumento médio entre 2% e 3%. Esses valores são aceitáveis não oferecendo risco para aumento do desgaste do revestimento refratário.

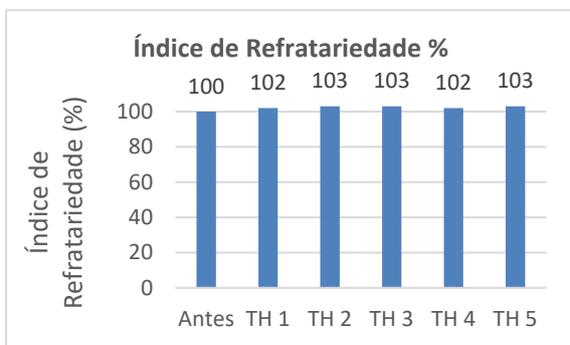


Figura 15. Resultados do ind. de refrat.

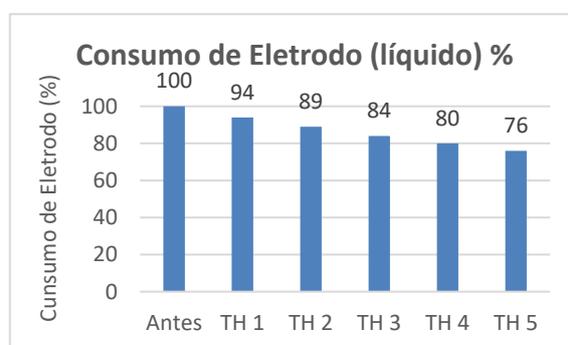


Figura 16. Resultados de cons. de eletrodo líq..

Já o consumo líquido de eletrodo, sem quebras, apresentou um excelente resultado (Figura 16), com redução de 24% no consumo específico (TH 5).

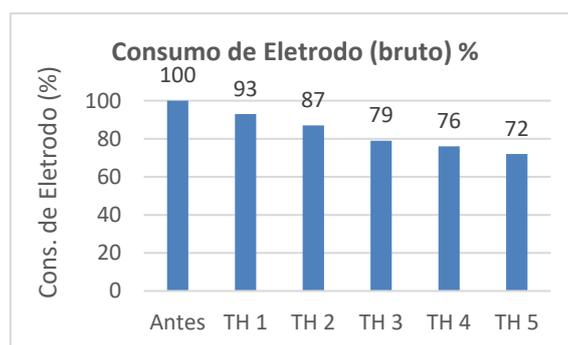


Figura 17. Resultados de consumo de eletrodo.

Outro ponto muito positivo do trabalho foi a redução do consumo bruto de eletrodo (com as quebras), pois houve uma redução de 28% com consumo específico (TH 5). Isso mostra que a nova configuração do programa de potência contribuiu para a redução das quebras provocadas principalmente por queda de sucata, superando dessa forma os objetivos do trabalho.

O programa de potência atual (Figura 18), foi padronizado conforme simulado e testado no experimento (TH 5) e tem apresentado bons resultados de redução de consumo de eletrodo.

PROGRAMA DE POTÊNCIA ATUAL					
1 CESTÃO			CARREGAMENTO GUSA LÍQUIDO		
ETAPA	Tensão (V)	Corrente (KA)	ETAPA	Tensão (V)	Corrente (KA)
Perfuração	856	30	Perfuração	900	30
Fusão	856 a 900	30	Fusão	900 a 1000	28 - 30
			Refino	816 a 856	28,5 - 30

Figura 18. Programa de potência atual

Na tabela (Tabela 3), temos os resultados médios de produtividade do FEA da SINOBRAS.

Tabela 3. Resultados de produtividade

Parâmetro	
Power On (min)	22
Tap to tap (min)	32
Produtividade (t/h)	75

3 CONCLUSÃO

Os excelentes resultados obtidos através desse trabalho mostram o quanto é importante definir uma metodologia adequada e ter um banco dados consistente com os principais parâmetros operacionais do FEA. O objetivo principal do projeto foi alcançado, pois houve uma redução do consumo específico líquido de eletrodo de grafite de 24%. O resultado para redução o consumo bruto de eletrodo, incluído as quebras, foi de 28%, isso ocorreu porque com a nova configuração do programa de potência houve uma redução das quebras de eletrodos provocadas por queda de sucatas. Todos esses resultados foram obtidos sem prejuízos ao refratário do forno e sem aquecimento significativo dos painéis refrigerados. O grande aprendizado do trabalho foi a quebra de alguns paradigmas, pois especialistas que conheciam nossos processos afirmavam que não seria possível alcançar reduções do consumo de eletrodo nessa magnitude. Outras variáveis importantes como consumo de energia e Power On (tempo de forno ligado) não apresentaram variações significativas.

REFERÊNCIAS

- 1 Dugan CR. "Simulation of Arc Furnace Power Systems". Industry Applications Society Annual Meeting, Los Angeles, CA, 1997.
- 2 Jaccard LR, "Principios básicos para definición de los parámetros operacionales de los hornos de arco - Diferenciación según la etapa de fusión – Efectos sobre el flicker la productividad y el consumo de electrodos" - 15º Seminario de Acerías del IAS – San Nicolás – Argentina, 2005.

- 3 Schwabe WE, “Determination of the optimum current in an arc furnace” – Iron and Steel Engineer, June 1954
- 4 Jaccard LR, Consumo específico de eletrodos em fornos elétricos a arco - correlação com os fatores de operação. 2003 [acesso em 05 de abr. 2019]. Disponível em: <http://www.jaccard.com.br/consumo.htm>.
- 5 Potey D, Bowman B, Alameddine S, “Electrode Consumption Model – Update 2004” - 8th European Electric Steelmaking Conference, Birmingham, UK, 2005: 3-11.