



## A PARTICIPAÇÃO DO CONSUMO DE ELETRODOS NO MODELO DE PROGRAMA DE POTÊNCIA DO FEA - AC - UHP (50 t) <sup>1</sup>

*Fernando Souza Candido*<sup>2</sup>  
*Servio Romulo Medeiros Passos*<sup>3</sup>  
*Douglas Jardim da Silva*<sup>4</sup>  
*Lauro Chevrand*<sup>5</sup>

### Resumo

No desenvolvimento dos programas de potência do Forno Elétrico a Arco de 50 toneladas, a CSN Aços Longos S.A. percebeu a chance de unificar o modelo de potência do Forno Elétrico com o modelo de cálculo de consumo de eletrodos.

Na concepção original, os TAP(s) do transformador e do reator, eram selecionados através dos parâmetros fornecidos pelo modelo: fator de potência, corrente do eletrodo, ângulo de defasagem, potência ativa, potência reativa, índice de refratário (hoje, lê-se índice de proteção dos painéis refrigerados), comprimento do arco e tensão de re-ignição. Entretanto, observou-se que o terceiro principal fator na formação do custo do aço líquido não havia sido contemplado, até então. Para corrigir esta lacuna, foi adicionado um modelo de consumo de eletrodo, que representa a operação do Forno do ponto de vista da estabilidade do arco, consumo de energia elétrica, produtividade, entre outros fatores.

**Palavras-chave:** Modelos; Programa de potência; Consumo; Eletrodos de grafite.

### PARTICIPATION CONSUMPTION OF ELECTRODES IN THE FEA - AC - UHP POWER MODEL (50 t)

#### Abstract

In developing of the power programs for 50 tons Electric Arc Furnace, CSN Long Steel SA saw the chance to unify the power model of electric arc furnace with the modeling of electrodes consumption. In the original concept, the TAP (s) of the transformer and the reactor, were selected using the parameters provided by the model: power factor, current lead, lag angle, active power, reactive power of the refractory index (now reads the index of protection of water cooled panels), arc length and voltage re-ignition. However, it was observed that the third main factor in the formation of the cost of liquid steel had not been covered until then. To correct this shortcoming, we added a consumption electrode model, which represents the operation of the furnace in terms of arc stability, consumption energy, productivity, among other factors.

**Key words:** Models; Power program; Consumption; Graphite electrodes.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM – Eng. Mecânico pelo ICMG, MSc. Engenharia de Materiais pelo IME – Gerente da Aciaria de aços Longos da CSN*

<sup>3</sup> *Engº Metalurgista Especialista da CSN Aços Longos S.A.*

<sup>4</sup> *Estudante de Engenharia Mecânica da UFF- Estagiário da CSN Aços Longos S.A.*

<sup>5</sup> *Membro da ABM – Eng. Metalurgista - Consultor e Representante – CTS – Chevrand Tecnologia Siderúrgica Ltda.*



## 1 INTRODUÇÃO

Os Eletrodos de Grafite para os Fornos Elétricos a Arco e Fornos Panela são importantíssimos sob o ponto de vista de custos, produtividade e estabilidade operacional.

Logo, associar a previsão do consumo de eletrodos às principais variáveis de processo é fundamental para a competitividade das Aciarias Elétricas.

Ao longo dos anos, os esforços técnicos realizados por diferentes públicos ligados diretamente ou indiretamente às Aciarias elétricas têm contribuído para o desenvolvimento e evolução das tecnologias em termos de equipamentos, de processos e de capacitação dos colaboradores. Como consequência disto, faz-se necessário o aperfeiçoamento dos modelos de programa de potência capazes de reduzir o consumo de eletrodos sem comprometer o desempenho operacional da Aciaria.

É digno de nota, os eletrodos de grafite seguindo a evolução de todos os demais componentes da cadeia produtiva, tiveram uma sensível melhoria na sua qualidade, principalmente, pelo desenvolvimento de matérias-primas utilizadas no processo de fabricação.

A Figura 1 apresenta a evolução tecnológica das principais variáveis de processo e de equipamentos introduzidos ao longo dos anos nas Aciarias Elétricas e evidência de forma explícita a redução do consumo específico de eletrodos de grafite nas Aciarias.

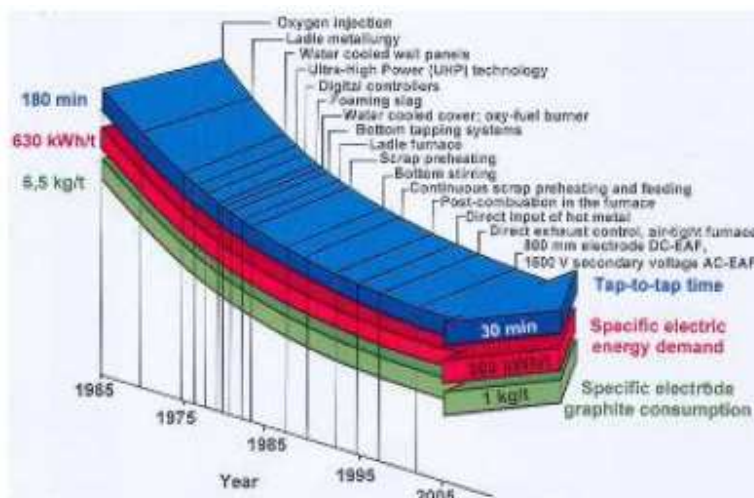


Figura 1 - Evolução do FEA desde 1965.<sup>(1)</sup>

É importante ressaltar neste trabalho, que o consumo específico de eletrodos no Forno Elétrico a Arco foi reduzido consideravelmente, a partir dos anos 80 com a introdução dos Fornos de alta reatância, chamados UHP (*Ultra High Power*).



## 2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Modelo de Cálculo de Potência do Circuito do Forno Elétrico a Arco da CSN

Para simplificar o entendimento, o circuito elétrico do FEA, mostrado na Figura 2, foi concebido utilizando os seguintes componentes:

- um transformador de 45 MVA;
- um reator de 9 MVA; e
- um filtro capacitivo.

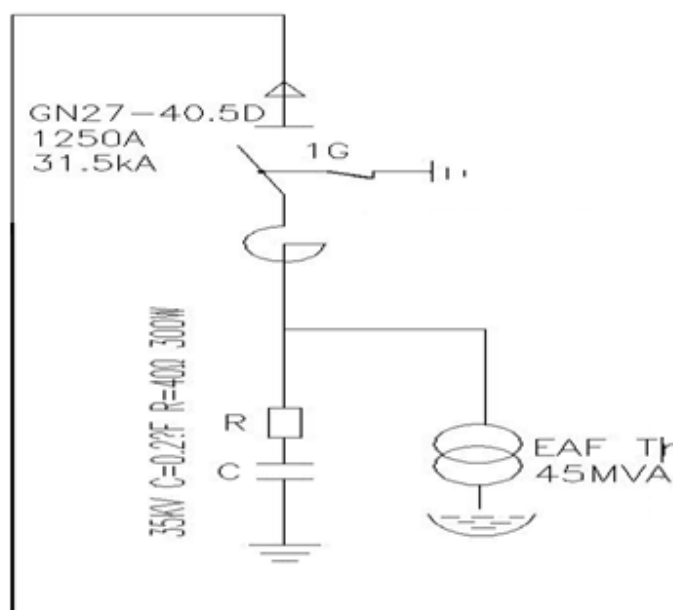


Figura 2 - Circuito Elétrico do Forno

O modelo de cálculo de potência do Forno Elétrico a Arco<sup>(2)</sup> considera que a resistência do arco é uma resistência variável, com amplitude de zero (curto circuito) até o infinito (extinção do arco). A partir desta consideração, foram calculadas todas as diferenças de potencial do circuito, bem como as potências ativas e reativas do transformador, levando em consideração as potências aparentes, ativas e reativas do circuito. E, assim, o fator de potência.

Para rodar o modelo é preciso selecionar a potência requerida para executar o programa de fusão, previamente, calculado pelo modelo de balanço térmico do Forno. Para, então, fazer o setup dos TAPS do transformador e do reator desejados. O modelo irá fornecer no ponto de operação, os seguintes dados:

- Fator de potência com as linhas de estabilidade no gráfico, corrente no eletrodo, ângulo de defasagem entre corrente e voltagem, potência ativa e potência reativa, índice de refratário (hoje, lê-se índice de proteção dos painéis refrigerados), comprimento do arco, a indutância equivalente no secundário, e a tensão de re-ignição

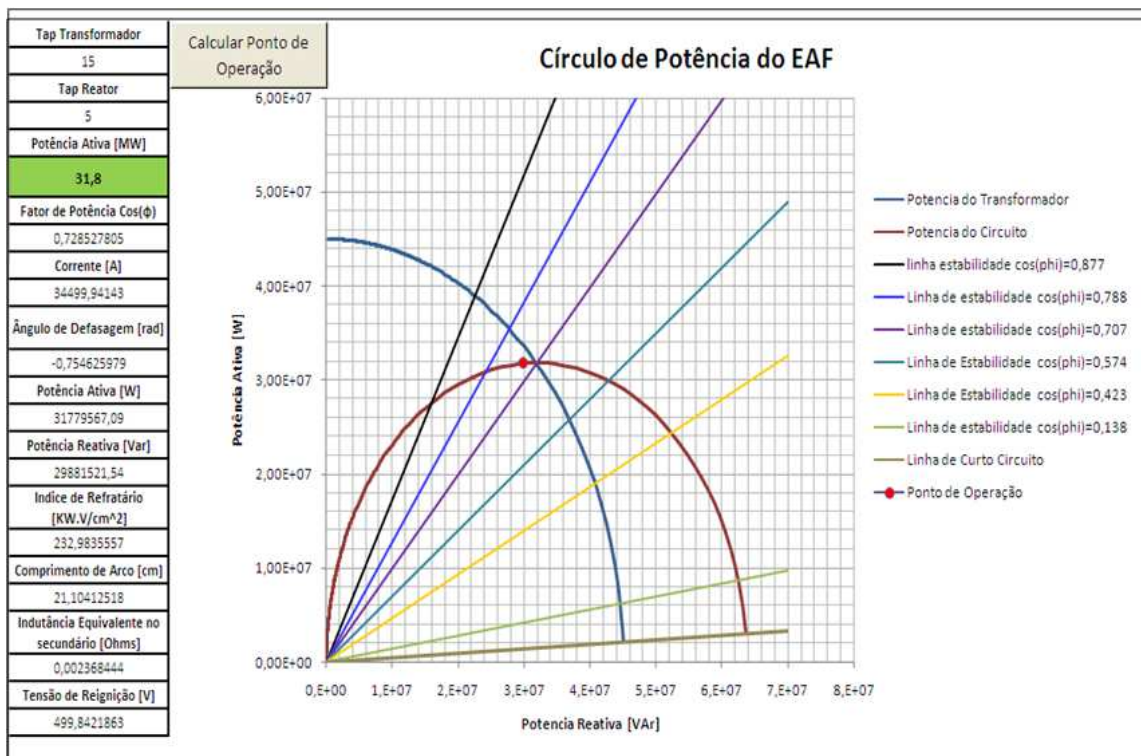


Figura 3 - Exemplo dos dados fornecidos pelo modelo para a potência ativa de 31,8 MVA, utilizando o TAP 15 do transformador e o TAP 5 do reator.

A Figura 3 mostra os dados obtidos para o nível de potência ativa de 31,6 MW usando o TAP 15 do transformador e o TAP 5 do reator.

## 2.2 Modelos de Cálculo do Consumo de Eletrodo

Dentre os modelos encontrados na literatura,<sup>(3-5)</sup> o que mais se destacou para os propósitos deste trabalho foi o apresentado por Didier et al.<sup>(3)</sup> O modelo considera a influência dos parâmetros elétricos e o efeito da taxa de oxigênio injetado no processo.

### 2.2.1 Consumo da ponta

$$C_p = KA * \left( \frac{I^2}{PO} \right) * h$$

Onde:

$K$  = Taxa de consumo específico da ponta em  $\left( \frac{kg}{KA^2} \right) * h$

$kA$  = média da Corrente de fase

$PO$  = Tempo de Forno ligado em horas

$p$  = Peso da corrida em toneladas

$h$  = distorção harmônica



## 2.2.2 Consumo de lateral

$$C_s = R_{OX} \left( \frac{A_{OX} * t_{tap}}{P_n} \right)$$

onde:

$R_{OX}$  = Taxa de consumo específico da lateral em  $\left( \frac{kg}{KA^2} \right) * h$

$A_{OX}$  = Área oxidada do eletrodo =  $\pi * D * L_{OX}$  em  $m^2$

$t_{tap}$  = Tempo tap to tap em horas

$p$  = Peso da corrida em toneladas

$$R_{OX} = 0,11 * \left( \frac{O_2}{t_{on}} \right) + 0,16 * J_o + \frac{3,02}{\left( \frac{L_{OX}}{L} \right)} - 4,42$$

onde:

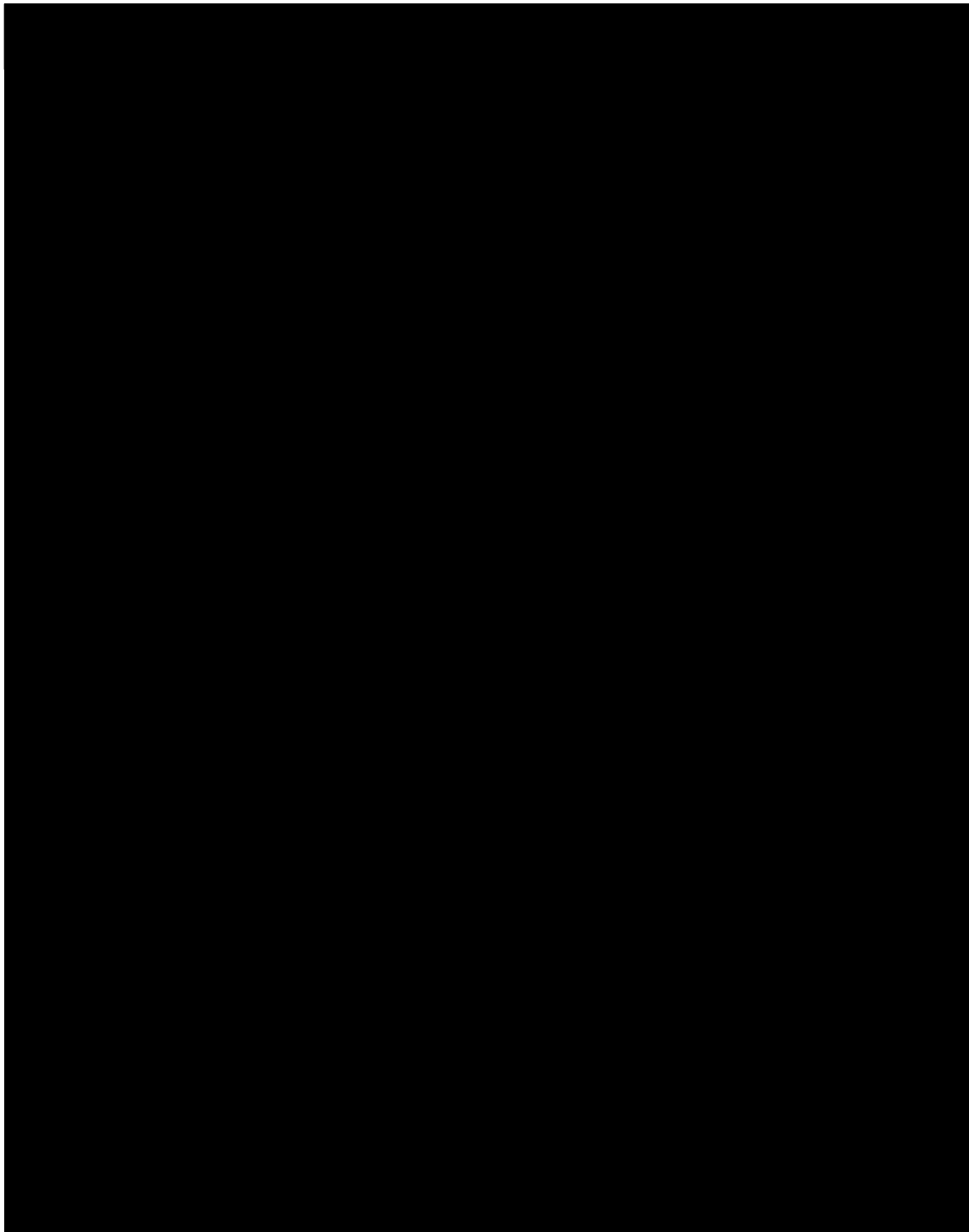
$O_2$  = Consumo de oxigênio em  $m^3$  por tonelada

$J_o$  = em  $\frac{A}{cm^2}$

$L_{OX}$  = comprimento da superfície oxidada do eletrodo

$L$  = Comprimento do eletrodo

Da forma como foram associados, o modelo de potência fornece a corrente média no eletrodo e os demais dados de entrada são preenchidos na planilha de cálculo desenvolvida para simular o modelo de consumo de eletrodos. O Quadro 1 mostra os resultados da simulação fornecidos pelo modelo, quando se utiliza o TAP 15 do transformador e o TAP 5 do reator.



**Quadro 1** - Resultados do modelo para as condições: TAP 15 do transformador, TAP 5 do reator e potência ativa requerida de 31,6 MW



### 3 RESULTADOS OBTIDOS

Para uma corrida de 50 toneladas no Forno Elétrico, considerando o tempo de Forno ligado de 38 minutos, o balanço térmico do Forno indica um consumo de energia elétrica de 390 kWh/t, com uma potência ativa requerida de 31,6 MW.

A Tabela 1 mostra as alternativas oferecidas pelo modelo para se atingir a potência de 31,6 MW.

**Tabela 1** - Alternativas para o atendimento à potência requerida

Parâmetros	ALTERNATIVAS DE PARÂMETROS DE UM POTÊNCIA PARA O PROGRAMA DE FUSÃO DO FEA - 50T - UHP							
	tap 15 reator 1	tap 15 reator 2	tap 15 reator 3	tap 15 reator 4	tap 15 reator 5	tap 14 reator 1	tap 14 reator 2	tap 13 reator 1
consumo da ponta dos eletrodos [Kg/Ton]	0,36	0,41	0,42	0,46	0,59	0,43	0,46	0,48
consumo lateral dos eletrodos [Kg/Ton]	0,91	0,94	0,94	0,96	1,01	0,94	0,96	0,96
consumo da Total [Kg/Ton]	1,27	1,34	1,36	1,42	1,60	1,37	1,41	1,44
Fator de potência	0,92	0,88	0,86	0,82	0,73	0,90	0,86	0,88
corrente eletrodo [A]	27017	28789	29139	30462	34500	29380	30430	31090
ângulo de defasagem [rad]	-0,39	-0,49	-0,54	-0,60	-0,75	-0,45	-0,54	-0,50
Potência ativa [W]	31532544	32074204	31586054	31735533	31779567	32110942	31669398	31606550
Potência Reativa [MVar]	13138560	17211429	18967270	21825511	29881522	15537553	19030758	17398101
Índice de refratário [KW.V/cm <sup>2</sup> ]	298	289	276	266	233	283	265	258
Comprimento do Arco [cm]	28,2	26,7	25,8	24,6	21,1	26,0	24,6	23,9
Tensão de Reignição [V]	280,6	345,1	375,8	413,6	499,8	305,2	361,1	323,0

Considerando como critério de estabilidade a linhas no círculo de potência com fatores de potência < 0,87 e as tensões de re-ignição mais altas, sobram duas alternativas que estão mostradas na Figura 4

Observa-se, que do ponto de vista da estabilidade do arco, a opção transformador TAP 15 - reator TAP 5 é a mais recomendável. Entretanto, quando se considera o consumo de eletrodos, a escolha recai sobre alternativa TAP 15 reator 4, conforme mostrado na Figura 5.

Esta alternativa representa uma redução de consumo de eletrodos de 0,18 kg/t que, se alcançada, resultaria, para um nível de produção de aço líquido de 400.000 toneladas por ano, uma economia de R\$ 1.584. 000, 00, considerando o custo de eletrodo de R\$ 22,00 o quilograma.



## Comparação entre Configurações

Tap Transformador	15
Tap reator	5

Tap Transformador	15
Tap reator	4

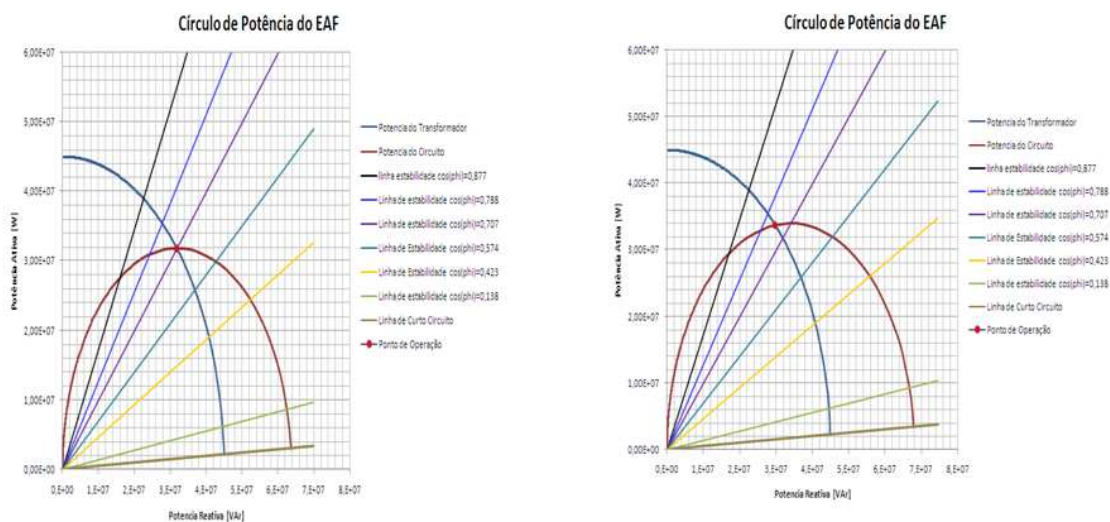


Figura 4 - Comparação entre as alternativas de ponto de operação para duas condições simuladas no programa de potência.

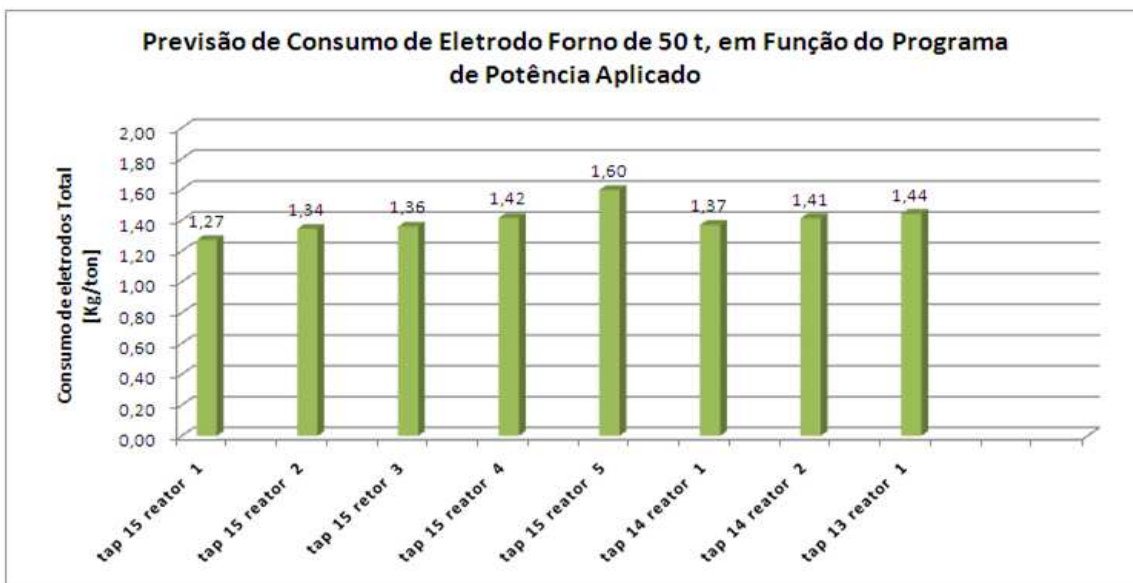


Figura 5 - Consumo de eletrodos de diversas alternativas para o programa de potência.

### 4 CONCLUSÃO

A complexidade teórica envolvida na elaboração dos programas de potência nas Aciarias Elétricas, onde os parâmetros elétricos são normalmente,





estabelecidos através de experimentos práticos, torna a maioria dos programas de potências um assunto hermético e de pouca transparência e familiaridade para a equipe de processo.

A condição de pré-partida da planta da CSN Aços Longos S.A. está permitindo construir uma base de conhecimentos técnicos, capaz de quebrar paradigmas e enxergar oportunidades de ganhos reais nos processos.

Este trabalho é fruto desta visão, onde se optou pelo desenvolvimento próprio de um modelo de cálculo de potência, para auxiliar na elaboração do programa de fusão, associado ao modelo de consumo de eletrodo, que possibilita selecionar alternativas mais seguras e econômicas para o desenvolvimento do processo de Forno Elétrico a Arco da CSN Aços Longos.

## REFERÊNCIAS

- 1 H. Feifer, and M. Kirschen; Thermodynamic Analysis of the EAF Energy Efficiency and Comparison with a Statistical Model of Electric Energy Demand; 7th Electric Steelmaking Conference, Venice, Italy, 26-29 may 2002, pp 1413-1428.
- 2 D. Jardim, S. Passos e Cândido. F. S.; Modelo de Potência do FEA - Reunião de Promoção, CSN Aços Longos, UPV - VR - DEZ 2009.
- 3 P. Didier and all - Ucar SA, Switzerland, Graftech Int. Ltd, USA- 8th European Electric Steelmaking Conference, Birmingham, UK- May 9-11 -2005
- 4 J.A.T. Jones, and all; Electric Furnace Steelmaking, chapter 10, pgs 562 a 576, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA. 1998 Henschke GMBH, Industrievertetungen-version 2007
- 5 L. R. Jaccard, Electrode Consumption Equations - Practical Application - ARC Furnaces – EAF And Electric System Advising.