



SIMULAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PROGRAMA DE POTÊNCIA PARA FORNO ELÉTRICO A ARCO¹

Jorge Pereira Siqueira de Jesus²
Fernando Souza Cândido³

Resumo

A energia elétrica é a principal matriz energética do Forno Elétrico a Arco, daqui por diante denominado FEA, sendo assim, faz-se necessário à criação de um Programa de Potência que controla e aperfeiçoa o processo de fusão e de refino do aço através da estabilidade do arco elétrico e do perfil da potência ativa. Esse estudo visa desenvolver, teoricamente, um programa de potência e de forma estruturada, simular as curvas de potência de um FEA de 50 toneladas com características *Ultra High Power*, associando a mesma com a construção do círculo de potência, utilizando os parâmetros elétricos do Forno: tensão, corrente, fator de potência, potência ativa e reativa, comprimento do arco elétrico, tensão de re-ignição do arco e índice de refratário. Todos os dados operacionais e elétricos simulados foram calculados e trabalhados utilizando como ferramenta o *Microsoft Office Excel* e considerando um sistema equilibrado e simétrico. Os resultados apresentam os parâmetros e disponibiliza as curvas características de um programa de potência.

Palavras-chave: Programa de potência; Parâmetros elétricos; Arco elétrico; Círculo de potência.

SIMULATION PROGRAM CHARACTERISTICS CURVES OF POWER FOR ELECTRIC ARC FURNACE

Abstract

Electricity is the main energy sources of the Electric Arc Furnace, so it is necessary to create a program that controls power and improves the melting and refining process of steel through stability electric arc and the profile of the active power. This study has been allowing to develop, in theory, in a structured a power program and to simulate FEA power curves and features UHP (Ultra High Power), associating itself with the construction of the power circle, using the electric parameters Furnace as: voltage, current, power factor, active and reactive power, arc length, voltage re-ignition and refractory index. All operating data and electrical simulations were calculated and worked using Microsoft Office Excel and considering a balance and symmetrical system. The results have showed the parameters and provide the characteristic curves of a power program.

Key words: Program of power; Electrical parameters; Arc; Circle of power.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Eletricista de Manutenção na Siemens Vai Metal Service e Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, MsC em Materiais, Professor do Centro Universitário de Volta Redonda e Gerente de Aços Longos da CSN.



1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é a principal matriz energética do Forno Elétrico a Arco, daqui por diante denominado FEA, sendo assim, faz-se necessário à criação de um Programa de Potência que controla e otimiza o processo de fusão e de refino do aço através da estabilidade do arco elétrico e do perfil da potência ativa.

Esse estudo visa simular um programa de potência utilizando de forma estruturada o cálculo de potência de um FEA de 50 toneladas com características *Ultra High Power* que possibilita a construção do círculo de potência associado aos parâmetros elétricos do Forno: tensão, corrente, fator de potência, potência ativa e reativa, comprimento do arco elétrico, tensão de re-ignição do arco e índice de refratário.

Todos os dados operacionais e elétricos simulados foram calculados e trabalhados utilizando o *Microsoft Office Excel* para apresentar os parâmetros e disponibilizar as curvas características de programa de potência do FEA, considerando um sistema equilibrado e simétrico.⁽¹⁻⁴⁾

2 TEORIA DO PROGRAMA DE POTÊNCIA

2.1 Indicadores Operacionais

2.1.1 Produtividade e consumo de energia

Para produzir uma tonelada de aço é necessária uma quantidade de energia que depende do tipo de carga metálica, do tipo de aço, da temperatura de vazamento, da quantidade e características da escória e de outros fatores. De um modo geral, para produção de aço, em condições normais, se espera que o Forno tenha um consumo de aproximadamente 550 kWh por tonelada de aço produzido. Uma porção desta energia é normalmente produzida por meios químicos, através da injeção de oxigênio, mas a principal parcela é suprida pelo arco elétrico.

A produção horária do Forno será proporcional à potência ativa (kW) e inversamente proporcional ao consumo específico de energia elétrica.^(2,5-8)

O tempo de Forno ligado permite obter a potência ativa máxima necessária ao processo, através da relação:

$$\text{Power On} = \frac{(\text{consumo de energia} \times \text{peso da corrida}) \times 60}{1000 * \text{potência ativa máxima} * \text{fator de carga}}$$

2.1.2 Consumo de eletrodos e refratários

O arco elétrico (que será abordado nos próximos itens) de um FEA influi diretamente no desgaste dos refratários do Forno e no consumo de eletrodos. Podemos dizer também que a mesma relação $V / (I X)$, onde: V (tensão), I (corrente) e X (reatância), que nos proporciona um arco estável e uma tensão de trabalho alta no Forno.^(5,7,9)

2.1.2.1 Eletrodos

São vários os fatores que influem no consumo de eletrodos, porém, os que realmente provocam o maior efeito sobre o consumo de eletrodos são os parâmetros elétricos do Forno. De forma resumida pode-se dizer que, para determinada potência ativa (P), o consumo de eletrodos depende fortemente da tensão de arco (ER). Durante a fusão de sucata, para aumentar a tensão de arco e manter os $\cos\phi$ inferiores a 0,80, necessários para estabilizar o arco, a reatância (X) do circuito deve ser elevada, para o qual são instalados reatores. No período de operação com



escória espumante é possível manter o arco estável com $\cos\phi$ próximos da unidade, para o qual convém operar com baixa reatância.^(7,9)

O modelo de consumo de eletrodos que será abordado nesse estudo, foi desenvolvido por P. Didier, que considera a influência dos parâmetros elétricos e o efeito da taxa de oxigênio injetado no processo sobre o consumo de eletrodos, conforme segue:

- Consumo na ponta (C_p)

Equação 1: Consumo de eletrodos na ponta^(3,9)

Onde:

- K: taxa de consumo específico da ponta em que $(kg/KA^2)*h$;
- KA: média da corrente de fase;
- PO (Power On): tempo do forno ligado em horas;
- p: peso da corrida em toneladas (t); e
- I: corrente (KA).

$$C_p = KA \times \left(\frac{I^2}{PO} \right) \frac{1}{p}$$

- Consumo lateral (C_s)

Equação 2: Consumo de eletrodos na lateral^(3,9)

Onde:

- R_{OX} : taxa de consumo específico da lateral;
- A_{OX} : área oxidada do eletrodo, dada por: $\pi * D * L_{OX}$ em m^2 ;
- t_{tap} : tempo tap to tap em horas; e
- p: peso da corrida em toneladas (t).

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

- Cálculo de R_{OX} (taxa de consumo específico da lateral dos eletrodos):

Equação 2.1: Cálculo da taxa de consumo específico da lateral^(3,9)

Onde:

- O_2 : consumo de oxigênio em m^3 por tonelada;
- J_o : em (A/cm^2) ;
- L_{ox} : comprimento da superfície oxidada do eletrodo (cm); e
- L: comprimento do eletrodo (cm).

$$R_{ox} = 0,11 \times \left(\frac{O_2}{ton} \right) + 0,16 \times J_o + \left[\frac{3,02}{\left(\frac{L_{ox}}{L} \right)} \right] - 4,42$$

2.1.2.2 Sobre os refratários (índice de desgaste – RI)

O desgaste de refratários é dado pelo índice de refratário (R_i), que nada mais é que a relação entre a potência do arco (P_a), tensão do arco (V_a) e a distância entre a face do eletrodo e a parede de refratário do forno (b^2). Dada pela Equação 3.

Equação 3: Índice de refratário^(3,5-8)

Onde:

- R_i : índice de refratário;
- V_a : tensão do arco (V);
- P_a : potência do arco em watts (W); e
- b^2 : distância entre a face do eletrodo e a parede de refratário do forno em metros (m).

$$RI = V_a \times \left(\frac{P_a}{b^2} \right)$$

O índice de refratário deve ser individualmente analisado nas diferentes etapas de funcionamento de um FEA, perfuração da carga, fusão e refino.

Na fusão o RI deve ser o maior possível de modo a não comprometer a estabilidade do arco.

Nos FEAs grandes o máximo de RI se dá, para valores de $\cos\phi$ entre 0,87 e 0,82.

No refino o RI deve ser mínimo a fim de proteger o revestimento do refratário da energia radiada.^(3,5-8)



2.2 Parâmetros Elétricos (Variáveis Elétricas)

2.2.1 Corrente do FEA

No FEA existem dois tipos de corrente, a corrente do forno I considerando o circuito trifásico, e, a corrente de curto circuito I_{cc} , que ocorre todas as vezes que uma peça de sucata toca num dos eletrodos. Segue abaixo essas duas relações.

- Corrente do Forno (I)

Equação 4: Cálculo da corrente no FEA^(2,3,5-8)

Onde:

$$I = \frac{E \times 3}{\sqrt{3} \times Z}$$

- I : corrente nas três fases (A);
- E : tensão (V);
- $3^{1/2}$: constante para circuitos trifásicos; e
- Z : impedância do circuito (Ω);

Essa corrente muda para cada tap do transformador combinado com um tap do reator.

- Corrente de curto circuito (I_{cc})

Equação 5: Cálculo da corrente de curto circuito^(2,5,6)

Onde:

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{3} \times X}$$

- I_{cc} : corrente de curto circuito (KA);
- V : tensão de saída do secundário transformador (V); e
- X : reatância ($m\Omega$).

2.2.2 Fator de potência (Cos ϕ)

O fator de potência indica qual porcentagem da potência total fornecida (kVA) é efetivamente utilizada como potência ativa (kW). Assim, o fator de potência mostra o grau de eficiência do uso dos sistemas elétricos. Valores altos de fator de potência (próximos a 1,0) indicam uso eficiente da energia elétrica.^(3,10)

2.2.2.1 Potências do forno (ativa, reativa, aparente e potência de perdas)

- Potência Ativa (KW):

Essa é a potência que, efetivamente, realiza o trabalho, ou seja, converte a energia elétrica em calor, através do arco elétrico.⁽¹⁰⁾

Equação 6: Cálculo da potência ativa no FEA^(2,5, 6,7,8,10)

Onde:

$$P = E \times I \times \sqrt{3} \times \text{Cos}\phi$$

- P : potência ativa (KW);
- E : tensão (KV);
- I : corrente (KA); e
- $\text{Cos}\phi$: fator de potência (F.P.).

- Potência Reativa (KVAR):

Potência usada apenas para criar e manter campos eletromagnéticos. Porém, enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um “espaço” no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

Equação 7: Cálculo da potência reativa no FEA^(2,5,6, 7,8,10)

Onde:

$$Q = E \times I \times \sqrt{3} \times \text{Sen}\phi$$

- Q : potência reativa (KVAR);
- E : tensão (KV);
- I : corrente (KA); e
- $\text{Sen}\phi$: fator de potência (F.P.).



O circuito indutivo cíclico absorve e acumula energia do sistema e devolve esta mesma energia ao sistema durante a extinção dos campos magnéticos, que ocorre duas vezes em todo ciclo de potência.

Deve ser observado que, enquanto a componente reativa da corrente não retira potência do sistema, ela causa perda de potência nos sistemas de transmissão e distribuição de potência devido aos aquecimentos dos condutores. Na prática os sistemas de transmissão de energia são predominantemente reativos indutivos.^(2; 10; 11)

- Potência Aparente (KVA):

As potências ativas e reativas, juntas, constituem a potência aparente, que nada mais é que a potência disponibilizada pela concessionária de energia elétrica.⁽¹⁰⁾

Equação 8: Cálculo da potência aparente no FEA^(2,5,6,7,8,10)

Onde:

$$S = E \times I \times \sqrt{3}$$

- S: potência aparente (KVA);
- E: tensão (KV); e
- I: corrente (KA).
- Potência de Perdas (KW):

Como a potência ativa é aquela que produz o trabalho, efetivamente, a potência de perdas é aquela dissipada pela resistência do circuito devido ao efeito Joule.^(5,6)

Equação 9: Cálculo da potência de perdas no FEA^(5,6)

Onde:

$$Pp = 3 \times Rp \times I_e^2$$

- Pp: potência de perdas (KW);
- Rp: resistência de perdas (Ω); e
- I_e: corrente média dos eletrodos (KA).

Para resistência de perdas (Rp), temos:

Equação 9.1: Cálculo da resistência de perdas no FEA⁽⁶⁾

$$Rp = Rt - Rf$$

Onde:

- Rt: resistência elétrica do secundário do transformador; e
- Rf: resistência do forno (condutores, barramentos, garras, eletrodos etc...)

2.2.3 Tensão e comprimento do arco elétrico no FEA

No FEA a tensão (V) e a corrente (I) de arco estão em fase, isto significa que o arco no FEA é resistivo, ou seja, seu fator de potência ($\cos\phi$) é muito próximo de 1. A tensão do arco (ER) é definida através de seu comprimento.

Ao longo da coluna do arco a distribuição de energia se faz praticamente constante e da ordem de 12 V/cm, resultando assim, a relação que segue abaixo, incluindo as quedas de tensão no ânodo e catodo.

$$\begin{aligned} ER &= 10V + 12 \times L_a + 30V \\ ER &= 12 \times L_a + 40V \end{aligned}$$

Logo o comprimento do arco:

$$L_a = \frac{ER - 40cm}{12}$$

Equação 10: Cálculo do comprimento do arco elétrico, em centímetros, no FEA^(2,5,6,7,8) e:

$$L_a = \left(\frac{V \times \cos\phi}{12 \times \sqrt{3}} \right) - 3,33cm$$



Equação 10.1: Cálculo do comprimento do arco elétrico, em polegadas, no FEA^(2,5,6,7,8)

Onde:

- La: comprimento do arco em centímetros (cm);
- ER: tensão do arco em volts (V);
- Cosφ: fator de potência; e
- V: tensão de saída no secundário do transformador do forno.

Também podemos calcular a tensão de arco através da equação 11.

$$ER = \frac{V \times \text{Cos}\varphi}{\sqrt{3}}$$

Equação 11: Cálculo da tensão do arco elétrico no FEA.^(2,5,6,7,8)

2.2.4 Estabilidade do arco e tensão de re-ignição

Existem formas distintas de se entender a instabilidade do arco que se manifesta, principalmente, nas etapas de fusão do FEA. Uma delas é o conceito de tensão de re-ignição do arco elétrico. Em circuitos onde a componente da reatância indutiva é predominante, a corrente elétrica fica atrasada em relação à tensão. Desta forma, o arco se extingue após a corrente passar pelo ponto zero.

Quanto maior for o atraso da corrente em relação à tensão (maior impedância), maior será a tensão na extremidade do eletrodo, quando a corrente se anula. Isto minimiza o tempo requerido para a tensão atingir o valor de re-ignição do arco, reduzindo, também, as amplitudes dos harmônicos gerados. A principal vantagem é poder operar com arcos longos.

Com este conceito de estabilidade do arco, um ponto muito próximo do máximo de potência é atingido para um determinado tap do transformador. Isto é conseguido adicionando se um reator sobre o circuito primário, para completar a reatância necessária para correção do fator de potência.^(10,12)

Haja vista que as referências estudadas orientam manter o Cosφ variando entre 0,70 e 0,87 durante as etapas de fusão da sucata.^(3,4,5,6,7)

3 SIMULAÇÃO TEÓRICA DO PROGRAMA DE POTÊNCIA

3.1 Reator e Transformador

Para simular o programa de um Forno com capacidade de 50 toneladas, serão usados os dados de placa de um transformador de potencial de 45 MVA/730V (lado secundário), com 15 TAPS. E um reator com a capacidade de 9 MVAR com 5 TAPS, cujo o objetivo é a correção do fator de potência do circuito elétrico do Forno para tornar o processo mais estável, principalmente durante a fusão.^(3,7)

3.2 Planilha de Cálculos

Com base nos parâmetros operacionais simulados, e, nas fórmulas de cálculos elétricos, foram desenvolvidas planilhas, que de forma simples mostram as combinações de taps do transformador e do reator, considerando um sistema trifásico simétrico e equilibrado, são elas:^(2,3,4)



3.2.1 Planilha de cálculos

Onde foram inseridas as equações mostradas acima e as variáveis elétricas do forno, necessárias para montar o círculo de potência.

3.2.2 Defasagem

Mostra para cada combinação de taps (transformador / reator) selecionada, o gráfico de defasagem entre tensão e corrente, juntamente com o valor da tensão de re-ignição do arco;

3.2.3 Gráficos de Potência

Contém o diagrama de potência ou círculo de potência do FEA, onde são mostrados para cada combinação de taps do transformador e do reator: a potência ativa, a potência reativa, o fator de potência, as linhas de estabilidade definidas pelo fator de potência, o índice de refratário, o comprimento do arco, a indutância equivalente no secundário do transformador e a tensão de re-ignição do arco;

3.2.4 Consumo de eletrodos

Esta nos mostra o consumo de eletrodos com base na corrente mostrada na planilha de Gráficos.

3.3 Regras e Objetivos do Programa

O objetivo do Programa de Potência é aperfeiçoar os parâmetros operacionais elétricos do FEA, necessário para a execução suave do processo, mas também permitir a otimização do consumo de energia, de eletrodos, refratários e aumento da vida dos painéis refrigerados. A Figura 1 mostra a segmentação do processo e as regras estabelecidas para cada nível.^(2,3,4,8,12,13,14)

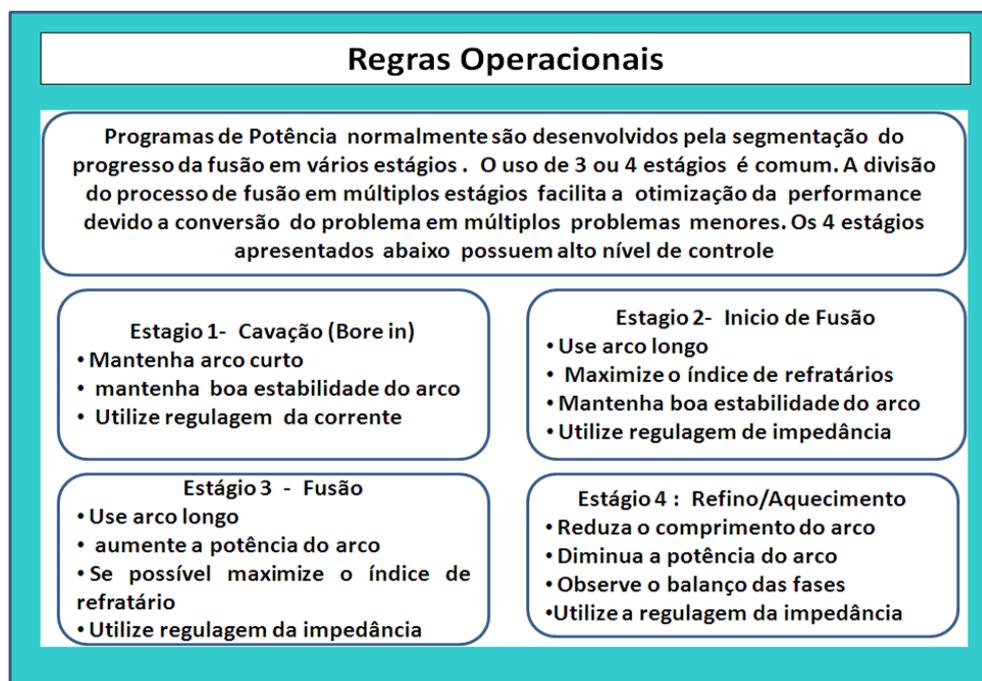


Figura 1. Divisão das regras do programa de potência.⁽¹⁵⁾



4 RESULTADOS OBTIDOS

De acordo com o nível de potência ativa, a simulação do programa de potência desenvolvido nas planilhas do *Microsoft Office Excel*, gera curvas de potência, que através da combinação de taps do transformador/reator, respeitando os limites de variação do fator de potência e seguindo os passos estabelecidos (Figura 1).

Na Tabela 1 serão descritas as combinações que, teoricamente e de acordo com os cálculos são mais viáveis. E logo abaixo os respectivos gráficos gerados pelo software *Microsoft Office Excel*.^(3,4,5,6,7,16)

Tabela 1. Resultados obtidos através das combinações transformador/reator^(3,4,16) (12/072011)

Combinação de taps	Estágios	Potência do arco (MW)	Fator de Potência (Cosφ)	Índice de desgaste dos refratários (KW*V/Cm ²)	Comprimento do arco (cm)	Corrente do secundário do transformador (KA)	Consumo de eletrodos (Kg/ton)
8/5	1	22,04	0,78	124,0423	16,8170	27,0470	1,25
15/5	2	30,4	0,80	248,8906	23,9526	29,8636	1,36
15/3	3	30,4	0,87	271,5601	26,4448	27,5089	1,27
10/5	4	22	0,82	150,7891	19,5170	25,7710	1,30

Seguem as Figuras, na ordem da Tabela 1.

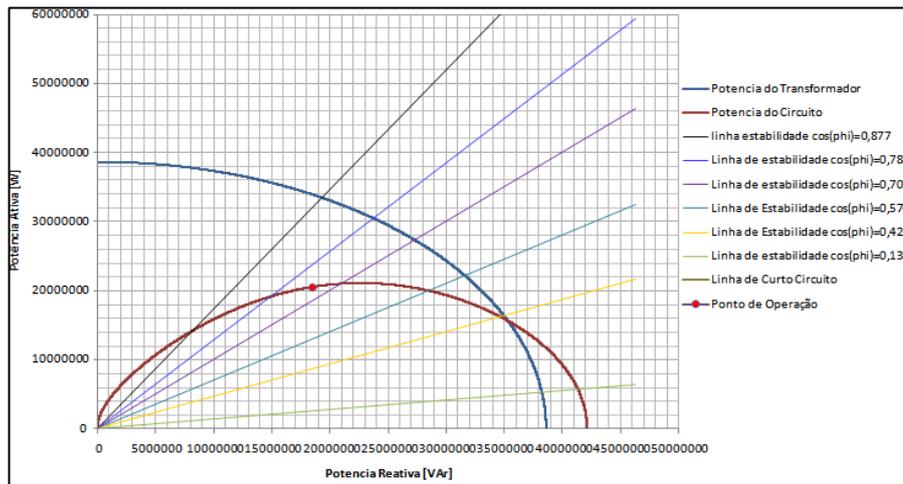


Figura 2. Combinação 8/5 (transformador/reator).

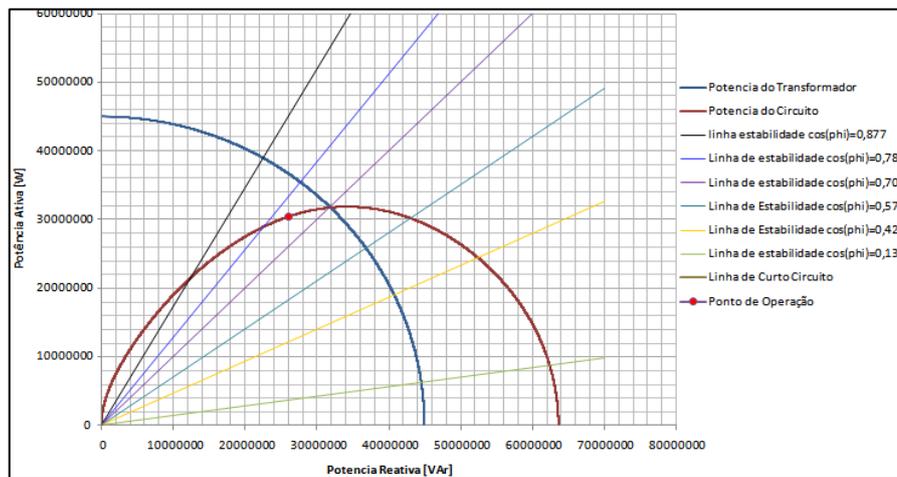


Figura 3. Combinação 15/5 (transformador/reator).

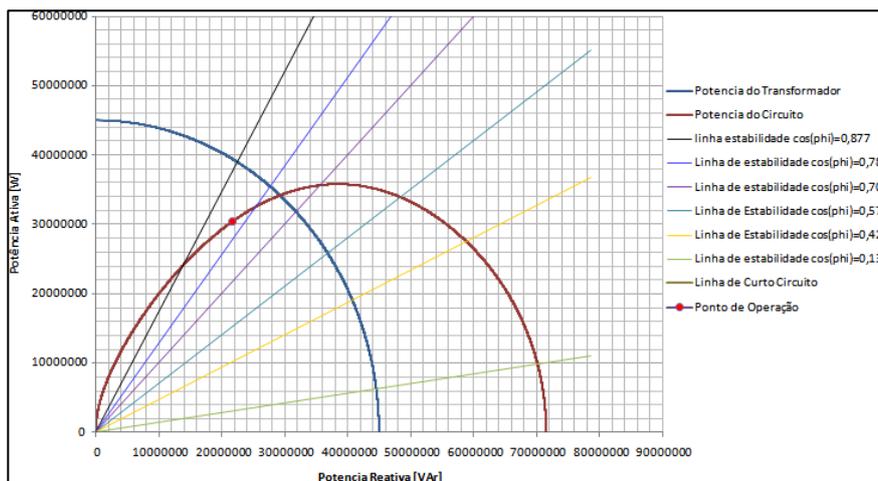


Figura 4. Combinação 15/3 (transformador/reator).

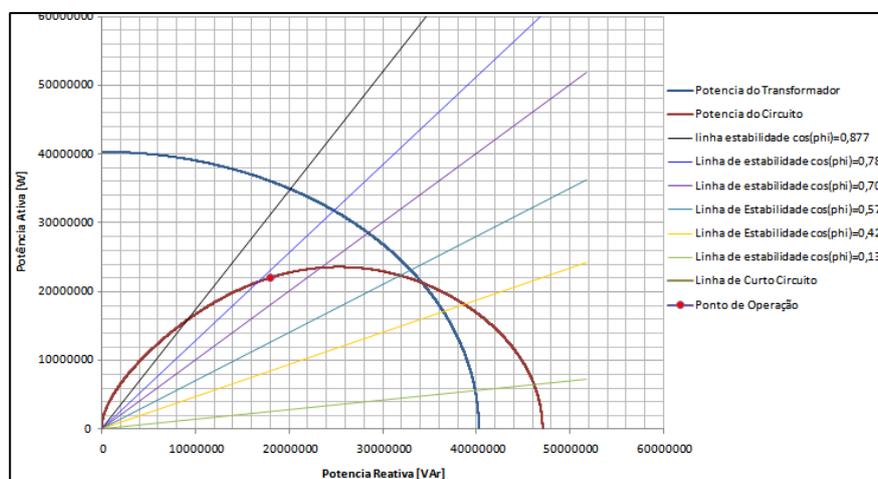


Figura 5. Combinação 10/5 (transformador/reator).

5 CONCLUSÃO

Face o apresentado neste trabalho, podemos ter uma idéia do funcionamento do programa de potência do FEA de forma teórico.

A simulação do programa de potência permite aos engenheiros e técnicos, encontrar orientações de melhorias no processo com impacto em redução de custos e aumento de produtividade

Os as curvas características geradas facilita a operação do equipamento e o entendimento dos operadores em relação à estabilidade do processo.

O estudo e a simulação do programa de potência do FEA garantem uma seleção segura e econômica dos métodos de operação do Forno.

Agradecimentos

Em especial ao Centro Universitário Fundação Oswaldo Aranha (UniFOA), que possibilitou esse trabalho através do Projeto de Iniciação Científica (PIC).

Ao meu Prof. MSc Orientador Fernando Souza Cândido, pela sua serenidade, paciência e dedicação. E também a todos os outros professores do Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA, que, tem colaborado com seus incentivos e palavras de apoio.



REFERÊNCIAS

- 1 STEINBERG, WS. Development of a control strategy for the open slag bath furnaces at Highveld Steel and Vanadium Corporation Ltd, 2008. 84 f. Dissertação (mestrado) – Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology University of Pretoria, Republic of South Africa, Dezembro 2008.
- 2 CANDIDO, Marcos Rogério, APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET NA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO, 2008. 151 f. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Dezembro 2004.
- 3 PASSOS, Sérgio Rômulo Medeiros et al, Programa de Potência do Forno Elétrico a Arco, 1º SETEC CSN AÇOS LONGOS - UPV - Volta Redonda - Setembro de 2010.
- 4 JACCARD, Luis Ricardo; Principios Basicos Para Definiçion de los Parametros Electricos Operacionales de los Hornos De Arco - Diferenciacion Segun La Etapa De Fusion - Efectos Sobre el Flicker la Productividad y el Consumo de Electrodo; disponível em: <http://jaccard.com.br/reatancia>; acessado em: 15/03/2011.
- 5 CHEVRAND, Lauro José de Sales; Aciaria Elétrica, Programa de Educação Continuada; Cursos, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Novembro de 2007.
- 6 RIBEIRO, Delmar Barros et al, Refino Secundário dos Aços, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Maio de 2000.
- 7 JACCARD, Luis Ricardo; Equívocos mais comuns relacionados com a operação dos fornos a arco; disponível em: <http://jaccard.com.br/equivocos.htm>; acessado em: 15/03/2011.
- 8 JACCARD, Luis Ricardo; Parâmetros Elétricos de Operação do Forno a Arco; disponível em <http://jaccard.com.br/informacoes.htm>; acessado em 15/03/2011.
- 9 JACCARD, Luis Ricardo; Consumo específico de eletrodos em fornos elétricos a arco - correlação com os fatores de operação; disponível em: <http://jaccard.com.br/consumo.htm>, acessado em 15/03/2011.
- 10 Energia reativa excedente – Manual de Orientação aos Consumidores – CODI
- 11 MELINTE, Daniel Octavian, CONTROL AND ADJUSTMENT METHODS FOR THE ELECTRIC PARAMETERS OF ELECTRIC ARC FURNACES, SISOM 2009 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 28-29 May.
- 12 MARTINEZ, Fernando, Experiences of High Impedance AC EAF arc regularion using the new AMI Automation's Power Input Optimization, McMaster Symposium on Iron & Steelmills Steelmaking Optimization in Mini-Mills, Hamilton, Ontario May 28 th, 1997.
- 13 PEENS, Marius. Modelling and Control of na Electrode System for a Three-phase Electric Arc Furnace, 2006. 150 f. Dissertação (mestrado) – Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology University of Pretoria, Republic of South Africa, Dezembro 2004.
- 14 BRYANT JR, Billy W. IDENTIFICATION, .SIMULATION AND OPTIMIZATION OF AN ELECTRIC ARC FURNACE, 2006 134 f. Dissertação (mestrado) – The Graduate College, The University of Iwoa, Maio 2006.
- 15 Figura traduzida de EAFAT Bryant Solution Group; www.bryantsolutions.biz
- 16 EAFAT Bryant Solution Group, disponível em: <http://www.bryantsolutions.biz/> acessado em 20/03/2011