

# Um Modelo Integrado Para Estudos de Compensação de Flicker Devido a Fornos Elétricos a Arco

M.F.Alves, D.G.Gomes, Z.M.A.Peixoto, J.P.M.Sousa, e C.P.Garcia

**Abstract--** Este artigo apresenta um modelo de forno elétrico a arco compensado, que utiliza o circuito oscilador de Chua para modelar a natureza caótica do arco elétrico. Um compensador estático do tipo reator controlado a tiristores é utilizado para mitigação do flicker. A estratégia de controle do compensador é detalhada e discutida. O modelo foi implementado no ambiente computacional ATP, objetivando aplicações em estudos de planejamento de sistemas.

**Index Terms—**Flicker, Fornos Elétricos a Arco, Teoria do caos, SVC.

## I. INTRODUÇÃO

O número de fornos elétricos a arco (FEA) instalado na indústria metalúrgica tem aumentado nas últimas décadas. Algumas das razões que levam a esse fato são a abundância de sucata, a necessidade de reciclar e a possibilidade de produzir ligas metálicas com maior nível de qualidade e com custo relativamente baixo quando comparado com outras formas de energia. Esses fornos têm um grande impacto na qualidade da energia, gerando harmônicos e impondo uma flutuação de tensão no sistema de potência, resultando no fenômeno da cintilação luminosa (flicker).

A modelagem dos fornos elétricos a arco vem sendo intensamente investigada. Alguns modelos são baseados nas características estocásticas apresentadas pelo arco e, mais recentemente, no comportamento caótico do arco [1]-[4].

Neste trabalho o modelo do arco utiliza o oscilador de Chua para gerar o sinal caótico [5][6]. O sinal de tensão calculado a partir das equações diferenciais dinâmicas do forno [7] é modulado por este sinal caótico de baixa frequência, saída do oscilador de Chua, resultando no comportamento randômico e não linear característico da flutuação de tensão do forno.

A crescente necessidade de se lidar com as perturbações existentes nos sistemas de potencia levou a indústria a desenvolver novos componentes e topologias de eletrônica de

potencia, alguns destes desenvolvidos já no início da década de setenta. Dentre estes, o reator controlado a tiristor com banco de capacitores fixo – RCT-CF, uma topologia clássica da classe dos Compensadores Estáticos de Reativo – CER, que, apesar de sua eficiência relativamente baixa para a mitigação de flicker, ainda é uma solução atraente, apresentando uma boa relação benefício versus custo [8]-[10]. Este trabalho apresenta um modelo do CER, incluindo sua estratégia de controle para mitigação de flicker, sendo todo o sistema desenvolvido no ambiente computacional ATP-EMTP. Um modelo para um flickermeter padrão IEC foi também implementado.

Um estudo de caso demonstra as possibilidades do modelo, incluindo uma metodologia para ajuste dos parâmetros do modelo, de acordo com o sistema de potencia em que o forno está ligado e com o nível de severidade esperado para o forno.

## II. MODELO DO ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico apresenta fases distintas durante o ciclo de operação do forno, sendo as fases de fusão e refino as mais relevantes. Na fase de fusão, quando se inicia o processo de fusão, a sucata apresenta uma superfície muito irregular, causando muita flutuação de corrente. A diminuição desta flutuação implica na redução da potencia reativa consumida pelo forno, o que permite que uma quantidade maior de potência ativa possa ser suprida, aumentando a eficiência do forno. Na fase de refino é adotado um arco maior e mais constante, e a flutuação de corrente é menor que na fase de fusão.

Como proposto em [1] [3] [4], o modelo do forno a arco foi desenvolvido em três partes. Uma equação diferencial que representa a característica dinâmica v-i do arco elétrico é resolvida, resultando em uma solução determinística para o problema. Um sinal caótico de baixa frequência é usado para representar a flutuação de tensão imposta ao arco. Este sinal caótico é então usado para modular a tensão obtida da solução determinística, e o resultado é o sinal característico de um forno a arco.

A característica determinística tensão-corrente do forno a arco pode ser obtida da equação diferencial que representa a dinâmica do arco, baseada na lei da conservação da energia. A equação de balanço da energia do arco elétrico é [7]:

---

Este trabalho foi financiado pela CEMIG – Cia Energética de Minas Gerais através do projeto n° 048 e pela CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Mário F. Alves; Deilton G. Gomes; Zélia Miriam A. Peixoto; João Paulo M. Sousa; Celso P. Garcia pertencem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, CEP 30535-610 BRA (correspondências com os autores através do telefone: 55-31-33194305; fax: 55-31-33194305; e-mail: mfabiano@pucminas.br).

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1)$$

sendo  $r$  o raio do arco, e  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são constantes.

A tensão no arco ( $v$ ) é dada por,

$$v = \frac{i}{g} \quad (2)$$

sendo  $g$  definido como a condutância do arco, e dada pela seguinte equação:

$$g = \frac{r^{m+2}}{k_3} \quad (3)$$

É possível representar as diferentes fases de operação do arco alterando os valores dos parâmetros  $m$  (variação da resistividade inversamente proporcional a  $r^m$ ) e  $n$  (condição de refrigeração do arco). Uma completa combinação destes parâmetros para as diferentes fases do arco pode ser encontrada em [7].

O oscilador de Chua é usado para simular a característica randômica e não linear apresentada pela flutuação de tensão do forno. O circuito de Chua é composto por ramos de elementos passivos conectados a um componente ativo não linear chamado diodo de Chua. Maiores detalhes podem ser vistos em [1] - [4].

A corrente suprida ao arco pelo transformador do forno é injetada como entrada para o modelo do arco. A tensão do arco elétrico é obtida da solução simultânea das equações (1)-(3). A solução destas equações é modulada pelo sinal caótico produzindo a tensão final de saída do forno a arco. O modelo comporta-se como uma fonte controlada, tendo a corrente como entrada e resultando na tensão do arco para cada intervalo de tempo, como apresentado na figura 1.

### III. AJUSTE DA CARGA DO FORNO

A partir de análises estatísticas de flicker causado por fornos a arco em operação, é possível obter uma estimativa dos níveis de flicker causados por uma nova instalação. O nível de severidade de flicker de curta duração - Pst, pode ser estimado pela seguinte expressão [11]:

$$P_{st(99\%)} = \frac{K_{st} X_{sist}}{X_{sist} + X_{forno}} \quad (4)$$

$$P_{st(95\%)} = \frac{1}{1,25} \times P_{st(99\%)} \quad (5)$$

$K_{st}$  = Fator de severidade do forno, variando entre 48 e 85;

$X_{sist}$  = impedância do sistema de suprimento;

$X_{forno}$  = impedância do forno, do PAC - Ponto de Acoplamento Comum até o transformador do forno.

Os parâmetros do modelo do arco podem ser ajustados em níveis desejáveis de operação, tanto para os estágios de operação do forno (estágios de fusão e refino), quanto para o grau esperado de severidade do forno. A seqüência de ajuste do modelo, necessária para se obter um bom desempenho é mostrada na figura 2.

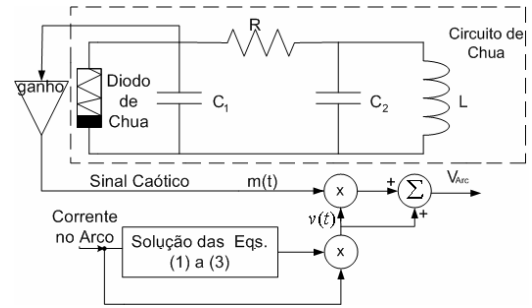


Fig. 1. Diagrama do algoritmo implementado para simulação do arco elétrico.

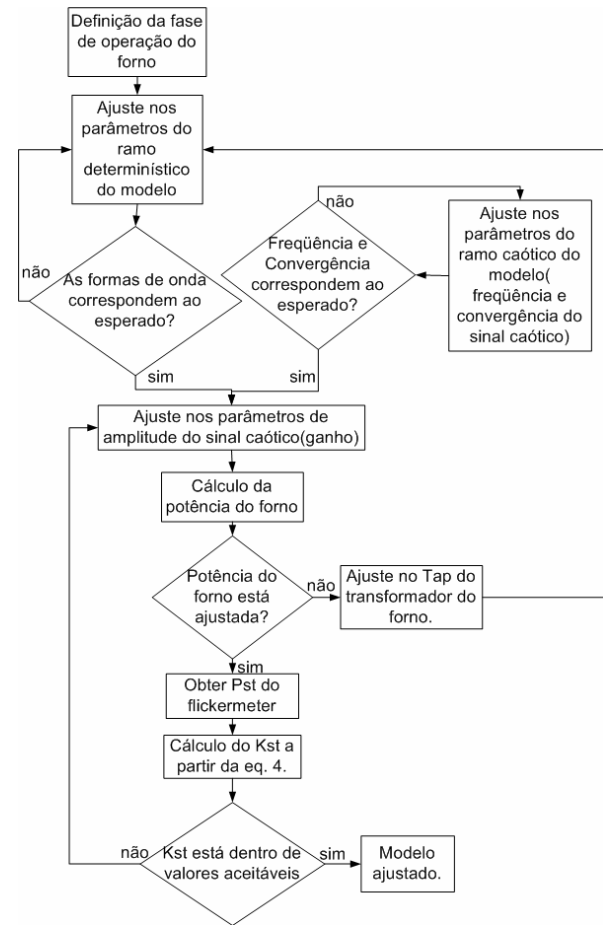


Fig. 2. Fluxograma de Ajuste do Modelo do Forno.

Neste trabalho, o nível de flicker produzido pelo forno é obtido pelo modelo de flickermeter definido pela IEC/UIE [12][13].

### IV. SISTEMA DE COMPENSAÇÃO

O RCT-CF em sua configuração clássica é composto de indutores de núcleo de ar, controlados através de tiristores que são ligados em antiparalelo, conforme figura 3. Paralelo ao RCT, tem-se bancos de capacitores fixos, parte deles necessários para a correção do fator de potência do forno, e parte para o suprimento das necessidades dinâmicas de reativo da carga. Uma parte (ou o total) desses capacitores é utilizada para constituir filtros de harmônicos, de forma a garantir níveis aceitáveis de harmônicos no sistema.

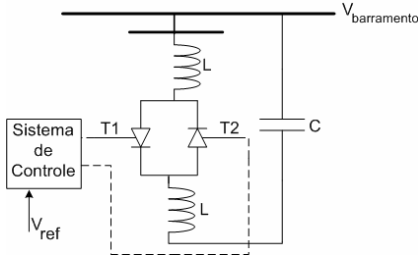


Fig. 3. Configuração Típica de RCT-CF.

O sistema enxerga o RCT-CF como uma reatância equivalente continuamente variável, controlado a partir da extração do ângulo de disparo  $\alpha$  do sinal de susceptância informado pelo sistema de controle.

A relação entre a susceptância do reator e o ângulo de disparo  $\alpha$ , normalizado em relação a reatância do reator, é dado por [14]:

$$B(\alpha)_{pu} = -\frac{\sin(2*\alpha) + 2(\pi - \alpha)}{\pi} \quad (6)$$

#### V. SISTEMA DE CONTROLE DO SVC

A estratégia para a mitigação da cintilação luminosa causada por FEA baseia-se na compensação de toda a corrente de seqüência negativa e da parte imaginária da corrente de seqüência positiva geradas pelo forno, conforme expresso pelas equações (5) e (6) [14]:

$$\text{Im}[\bar{I}_{fea,pos}] + \text{Im}[\bar{I}_{CER,pos}] = 0 \quad (5)$$

$$\bar{I}_{fea,neg} + \bar{I}_{CER,neg} = 0 \quad (6)$$

As susceptâncias de compensação desejadas são obtidas da admitância da carga (FEA), a qual pode ser encontrada a partir das correntes e tensões de linha medidas. A análise de um circuito trifásico, contendo uma fonte de tensão balanceada com seqüência de fase positiva, alimentando uma carga desbalanceada, permite encontrar as equações das componentes simétricas das correntes de linha. Em seguida, pode-se encontrar também, as equações das correntes de carga em função da suas admitâncias, como apresentado na equação (7), onde  $\bar{I}_{fea,zero}$ ,  $\bar{I}_{fea,pos}$  e  $\bar{I}_{fea,neg}$  são os fasores de corrente de seqüência zero, positiva e negativa, respectivamente, e  $V$  é a tensão fase-neutro.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{fea,zero} &= 0 \\ \bar{I}_{fea,pos} &= (\bar{Y}_{fea,ab} + \bar{Y}_{fea,bc} + \bar{Y}_{fea,ca})V \\ \bar{I}_{fea,neg} &= -(\bar{h}^2 \bar{Y}_{fea,ab} + \bar{Y}_{fea,bc} + \bar{h} \bar{Y}_{fea,ca})V \end{aligned} \quad (7)$$

Conectando em paralelo neste mesmo sistema trifásico, um compensador de reativos ligado em delta, suas componentes simétricas das correntes de linha são encontradas de modo similar ao que foi desenvolvido para as correntes de linha da carga, sendo dadas por:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{SVC,pos} &= j(B_{SVC,ab} + B_{SVC,bc} + B_{SVC,ca})V \\ \bar{I}_{SVC,neg} &= -j(\bar{h}^2 B_{SVC,ab} + B_{SVC,bc} + \bar{h} B_{SVC,ca})V \end{aligned} \quad (8)$$

Onde  $\bar{I}_{SVC,pos}$  e  $\bar{I}_{SVC,neg}$  são, respectivamente, os fasores de correntes de seqüência positiva e seqüência negativa do compensador. Considerando as equações (5) e (6) e utilizando as correntes dadas em (7) e (8), pode-se obter as equações das susceptâncias fase-fase, para o compensador ideal, como:

$$\begin{aligned} B_{SVC,ab} &= -\frac{1}{3V} (IM[\bar{I}_{fea,pos}] + IM[\bar{I}_{fea,neg}] - \sqrt{3}RE[\bar{I}_{fea,neg}]) \\ B_{SVC,bc} &= -\frac{1}{3V} (IM[\bar{I}_{fea,pos}] - 2IM[\bar{I}_{fea,neg}]) \\ B_{SVC,ca} &= -\frac{1}{3V} (IM[\bar{I}_{fea,pos}] + IM[\bar{I}_{fea,neg}] + \sqrt{3}RE[\bar{I}_{fea,neg}]) \end{aligned} \quad (9)$$

Estas equações expressam a susceptância de compensação em termos dos fasores das correntes de linha da carga ( $\bar{I}_{fea,a}$ ,  $\bar{I}_{fea,b}$  e  $\bar{I}_{fea,c}$ ) [14].

Considerando que a compensação é composta pelo conjunto reator controlado mais filtros (considerando toda a compensação capacitiva constituída por filtros), subtraindo da susceptância do SVC a susceptância do filtro, obtêm-se as susceptâncias fase-fase exigidas para o RCT,  $B_{TCR,ab}$ ,  $B_{TCR,bc}$  e  $B_{TCR,ca}$ .

Para o cálculo das partes real e imaginária da corrente de linha do forno foi utilizado o sistema de transformada dq a dois eixos sincronizados com a freqüência da rede, desacoplando desta forma as componentes real e reativa da corrente. O vetor corrente resultante desta transformação pode ser dividido em duas parcelas: a componente de seqüência positiva e a componente de seqüência negativa, sendo ambas as componentes extraídas no sistema de coordenadas dq.

De posse das correntes de seqüência positiva e negativa, ambas têm que ser analisadas com respeito à posição de fase da tensão do barramento, de forma a se fazer a discriminação entre a parte real e a parte imaginária. Um circuito de sincronismo (PLL) é usado para este propósito.

Transformando a corrente de seqüência positiva do forno para o sistema de rotação de seqüência positiva definido pelo PLL, obtêm-se as partes real e imaginária da corrente de seqüência positiva da carga,  $I_{d,pos}$  e  $I_{q,pos}$ . Realizando as mesmas operações para seqüência negativa, porém considerando a rotação no sentido contrário, tem-se a corrente de seqüência negativa da carga, composta por  $I_{d,neg}$  e  $I_{q,neg}$ .

$I_{q,pos}$ ,  $I_{d,neg}$  e  $I_{q,neg}$  são as componentes utilizadas como partes real e imaginária das correntes do forno na equação (9). Assim, após subtrair-se de (9) a susceptância do filtro, obtêm-se as susceptâncias fase-fase para o RCT.

Usando a relação entre o ângulo de disparo  $\alpha$  e a susceptância do RCT dada em (4), o valor adequado de  $\alpha$  pode ser calculado, e então repassado ao circuito de disparo para efetivar a ação de controle. O valor de  $\alpha$  deve ser obtido de forma iterativa, uma vez que não é possível estabelecer uma expressão analítica que permita seu cálculo diretamente. A fig. 4 mostra o diagrama em blocos do controle do SVC como descrito acima.

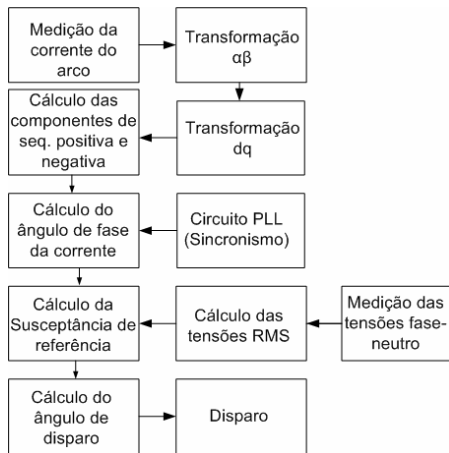


Fig. 4. Diagrama em Blocos do Circuito de Controle do SVC.

## VI. UM ESTUDO DE CASO

Os dados para o caso estudo são apresentados no apêndice. O fator de severidade  $K_{st}$ , o qual é diferente para cada instalação do forno, tem valores típicos entre 48 e 85. Usando estes dados, as equações (5) e (6) apresentaram, para este caso exemplo, uma estimativa para  $P_{st}(95\%)$  entre 2,64 e 4,64. No processo de definição dos parâmetros de inicialização do modelo integrado forno/sistema de potência, o modelo é ajustado segundo seção 3.0. Qualquer que seja a escolha para os parâmetros de inicialização, o resultado do  $P_{st}$  deve estar dentro dos limites apresentados. Diferentes níveis de  $P_{st}$  correspondem a menor severidade (menor  $K_{st}$ ) ou maior severidade (maior  $k_{st}$ ) do flicker produzido pelo forno.

Um modelo de um forno elétrico a arco compensado, incluindo o modelo do arco e do RCT-CF foram implementados no Alternative Transients Program (ATP). A Fig.5 apresenta o diagrama unifilar para o caso exemplo estudado, cujos dados são apresentados no Anexo.

### A. Sistema Sem Compensação

As formas de onda obtidas para a fase de fusão da carga são apresentadas a seguir. A figura 6 apresenta a forma de onda da tensão fase neutro no secundário do transformador do forno. A frequência de modulação para as três fases fica em torno de 8 a 10 Hz, como esperado.

A forma de onda da corrente no secundário do transformador do forno é apresentada na figura 7 e a característica  $v-i$  do arco na figura 8. A Figura 9 mostra a forma de onda da tensão fase neutro no ponto de acoplamento comum(PAC), no lado de alta tensão do transformador da planta. A Figure 10 mostra uma visão detalhada da tensão fase neutro na fase A do PAC; a flutuação de tensão devido à carga do arco é claramente vista.

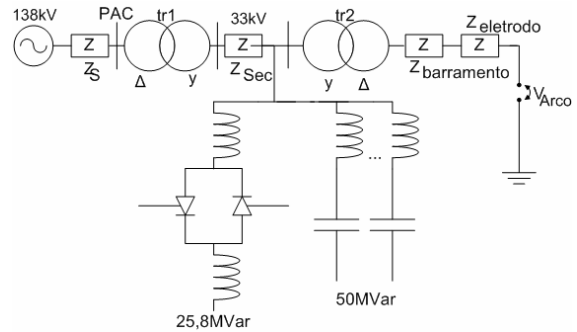


Fig. 5. Diagrama unifilar do caso estudo.

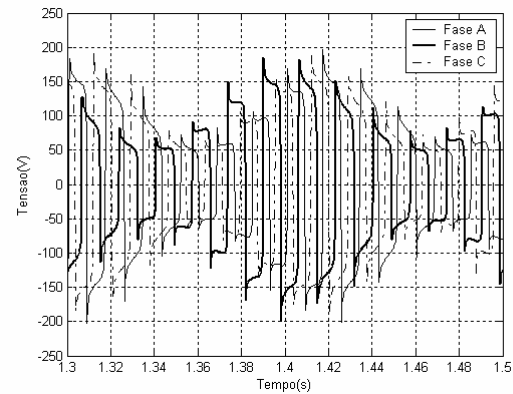


Fig. 6. Tensão fase-neutro para as três fases no secundário do transformador do forno.

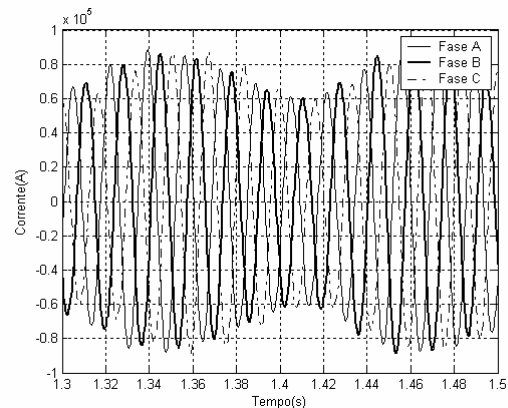


Fig. 7. Correntes no secundário do transformador do forno.

Para o sistema não compensado o valor indicado pelo flickermerter, no ponto de acoplamento comum, é  $P_{st}(95\%)=2,853$ .

A forma de onda de corrente no PAC é apresentado pela figura 11, e a figura 12 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na fase A no PAC.

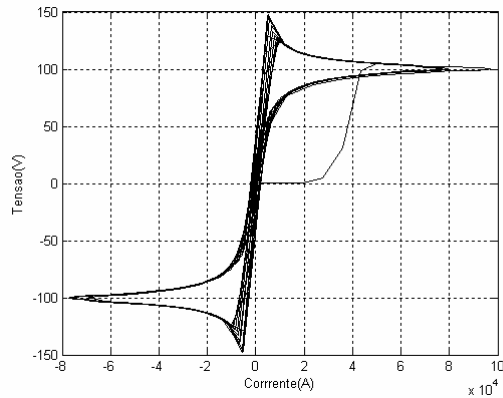


Fig. 8. Característica v-i do arco.

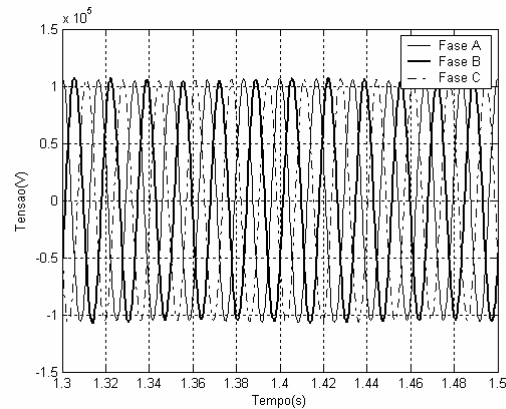


Fig. 9. Tensão Fase Neutra (fases a, b e c) no PAC.

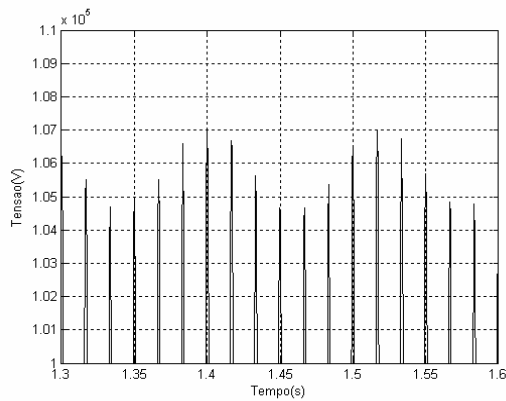


Fig. 10. Detalhe da forma de onda da tensão (fase a – neutro), no PAC.

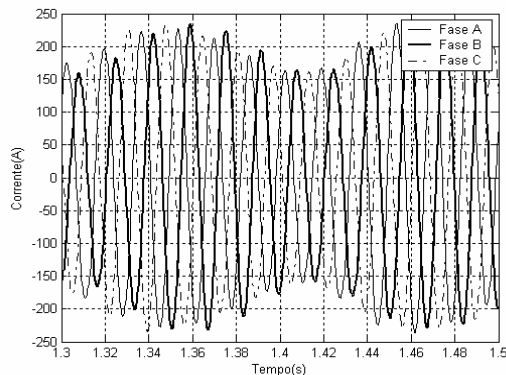


Fig. 11. – Formas de ondas das correntes, para as três fases no PAC.

### B. Sistema Com Compensação

O resultado para a simulação do sistema com compensação é apresentado nas figuras abaixo. A Figura 13 apresenta a forma de onda de tensão fase neutro no PAC. O resultado do efeito do RCT na forma de tensão é claramente visualizado na figura. 14, onde uma visão detalhada da tensão na fase a é apresentada. Com o uso da compensação o Pst calculado é reduzido para  $Pst(95\%) = 1,652$ , indicando uma redução de 42% do nível de flicker em relação ao nível obtido com o sistema não compensado. Finalmente na fig. 15, são apresentadas formas de onda de tensão e corrente da fase a no PAC. Como esperado, pela estratégia de controle usada, uma total compensação do fator de potência é obtida.

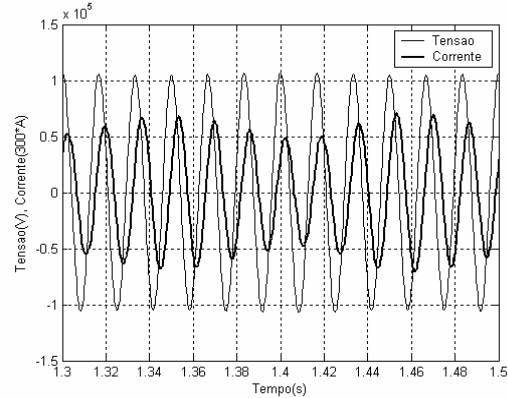


Fig. 12. Forma de onda da tensão e corrente da fase a, no PAC.

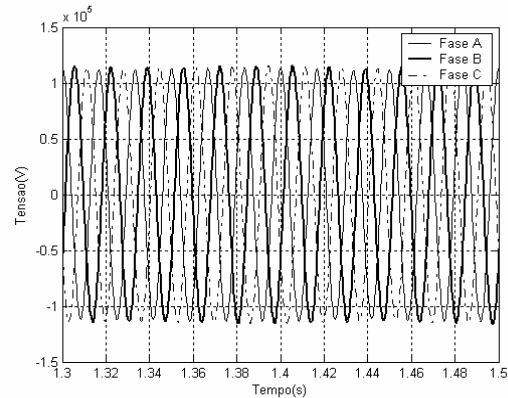


Fig. 13. Forma de onda da tensão e corrente da fase a, no PAC.

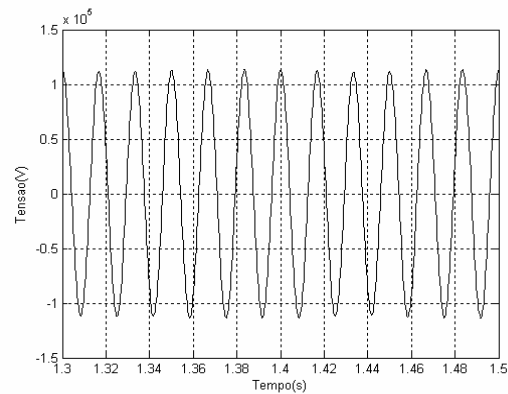


Fig. 14. Tensão fase neutro (fase a) no PAC.

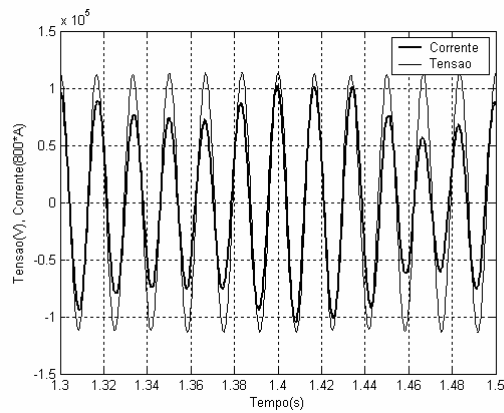


Fig. 15. Forma de onda da tensão e corrente da fase A, no PAC.

## VII. CONCLUSÃO

O modelo de forno a arco compensado implementado mostrou-se adequado para a simulação dos distúrbios causados por fornos elétricos a arco em sistemas de potência, bem como de seus efeitos sobre o ser humano (flicker). O modelo é suficientemente flexível para estudos do impacto de novas instalações de fornos a arco sobre o sistema, permitindo inclusive o dimensionamento (em nível de estudos de planejamento) da compensação necessária para mitigar o problema do flicker.

## VIII. APÊNDICE

Dados do sistema estudado apresentado na fig. 5 estão apresentados aqui.

Fonte: fonte de tensão senoidal ideal; tensão nominal: 138 kV

Impedância de Thevenin do sistema:  $1,9 + j37,7 \Omega$

Transformador 01: trifásico  $\Delta - Y$  (aterrado); 40 MVA; 138/33 kV;  $X = 9\%$ .

Circuito de Media tensão:  $Z_{sec} = j0,098 \Omega$

RCT: Potência nominal trifásica: 25,8 MVA

Filtros: Potência Capacitiva Total: 50 MVAR

Filtro de segundo. harm.: 7,5 MVAR

Filtro de terceiro. harm.: 15 MVAR

Filtro de quarto. harm.: 5 MVAR

Filtro de quinto. harm.: 15 MVAR

Filtro de sétimo. harm.: 7,5 MVAR

Transformador do Forno: banco trifásico  $Y$  (aterrado)-  $\Delta$ ; 10 MVA; 33/0,35 kV; Tapes: de 0,28 a 0,38 kV;  $X=7\%$ .

Forno a Arco: 30 MVA; 0,35 kV; 49,5 KA; Impedância do barramento de alta corrente:  $j0,4147 \Omega$

Reatância do eletrodo:  $j2,0999654 \Omega$

Parâmetros da equação 1:  $k_1=2500$ ;  $k_2=1$ ;  $k_3=4$ ;  $m=0$ ;  $n=2$ .

Parâmetros do circuito de chua:  $C_1=15,05 \mu F$ ;  $C_2=150 \mu F$ ;

$L=2H$ ;  $R=482,4655 \Omega$ .

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] O. Ozgun, A. Abur, "Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, 2002.
- [2] P. E. King, T. L. Ochs, A. D. Hartman, "Chaotic Responses in Electric Arc Furnaces". Journal Applied Physics, vol. 76, no. 4, pp. 2059-2065, 1994.
- [3] Sousa, J. P. M., Peixoto, Z. M. A., Alves, M. F., Garcia, C. P. "An Electric Arc Furnace Model for Flicker Estimation", Proceedings of the WSEAS International Conference ESPOCO 05. April 2005.
- [4] Sousa, J. P. M., Peixoto, Z. M. A., Alves, M. F., Garcia, C. P., "Um modelo de Forno Elétrico a Arco Utilizando a Teoria do Caos", VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2005.
- [5] M. P. Kennedy, "Three Steps to Chaos - Part I: Evolution," IEEE Transactions on Circuits and Systems, Fundamental Theory and Applications, Vol. 40, No. 10, 1993.
- [6] M. P. Kennedy, "Three Steps to Chaos - Part II: A Chua's Circuit Primer," IEEE Transactions on Circuits and Systems, Fundamental Theory and Applications, Vol. 40, No. 10, 1993.
- [7] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajaković, "A Harmonic Domain Computational Package for Nonlinear Problems and Its Application to Electric Arcs". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, 1990.
- [8] C. S. Chen, H. J. Chung, C. T. Hsu, S. M. Tseng, "Stochastic Voltage Flicker Analysis and Its Mitigation for Steel Industrial Power Systems". IEEE Porto Power Tech Conference 10th -13th September, Porto, Portugal, 2001.
- [9] C. Sharmeela, G. Uma, M.R. Mohan and K. Karthikeyan, "Voltage Flicker Analysis and Mitigation- Case Study in AC Electric Arc Furnace Using PSCAD/EMTDC", International Conference on Power System Technology - POWERCON, 2004 Singapore, 21-24 November 2004.
- [10] S. Poudel and N. R. Watson, "Assessment of Light Flicker Mitigation using Shunt Compensators", International Conference on Power System Technology - POWERCON, 2004 Singapore, 21-24 November 2004.
- [11] A. Robert, M. Couvreur, "Recent Experience of Connection of Big Arc Furnaces with Reference to Flicker Level," CIGRE 1994, Paper 36-305.
- [12] IEC Flickermeter - Functional and Design Specifications, IEC 61000-4-15 International Standard, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 15, 1st Ed, 1997.
- [13] UIE Part 5 Flicker and Voltage Fluctuation. Prepared by de travail GT "Qualité de l'alimentation" "Power Quality" Working Group WG 2, 1999.
- [14] Miller, T. J. E. "Reactive Power Control in Electric Systems," Editora John Wiley, 1982.