

SCQ-008

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

STE

SESSÃO TÉCNICA ESPECIAL DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA

MODELAGENS DE CARGAS NÃO LINEARES: LÂMPADAS DE DESCARGA E MÁQUINAS DE SOLDA

Antônio José Hilarino Cascelli Schelb
UNIVALE – Universidade Vale do Rio Doce

Milton Itsuo Samesima
UFU – Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO

Os objetivos deste artigo podem ser resumidos como a verificação do comportamento de cargas não lineares, tais como: lâmpadas de descargas e máquinas de solda elétricas; através da comparação de resultados obtidos experimentalmente e modelos analíticos propostos. Estes resultados foram desenvolvidos para diversos tipos de Lâmpadas de descargas e máquina de solda nas condições nominais de operação.

Palavras-chave: Modelagens, Cargas não Lineares, Qualidade da Energia, Lâmpadas.

1.0 - INTRODUÇÃO

No contexto geral dos sistemas de energia, os fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica, fornecida pelas concessionárias, tem-se tornado um fato relevante tanto para as concessionárias, como também, para os consumidores. A melhoria na qualidade da energia elétrica, tornou-se inevitável, tendo em vista a sensibilidade dos equipamentos elétricos/eletrônicos atualmente utilizados pelos consumidores. Portanto, as concessionárias que procuram manter a competitividade no mercado de fornecimento da energia elétrica, devem se manter atualizadas e atentas com as questões da qualidade da energia no que tange às novas exigências do mercado consumidor/supridor.

As cargas conhecidas normalmente como cargas elétricas não lineares ou cargas elétricas especiais, dentre as quais se enquadram aquelas que possuem como princípio de funcionamento o arco elétrico, tais

como: as lâmpadas de descarga e as máquinas de solda a arco elétrico, interferem na qualidade da energia. Neste sentido, as referidas cargas podem ser avaliadas através de modelos analíticos que simulam seus comportamentos.

Objetivando-se assim, verificar os desempenhos destas cargas, este artigo procura estabelecer e propor modelos que buscam reproduzir os reais comportamentos das cargas mencionadas.

Assim sendo, serão enfocados os seguintes aspectos:

A. Contribuições nas metodologias utilizadas para a determinação das constantes de proporcionalidade inerentes aos modelos.

B. Obtenção através de resultados experimentais de todos os parâmetros, (tensão, corrente, condutância, etc), relacionados às cargas consideradas.

C. Simulação digital dos modelos apresentados.

D. A avaliação dos modelos através da comparação das formas de onda da tensão, corrente do arco, figuras de Lissajous, decomposição harmônica das ondas de tensão, corrente do arco e erros de DHT (Distorção Harmônica Total).

2.0 - MODELAGENS DAS CARGAS

Um dos principais modelos utilizados para a simulação das características do arco elétrico foi originalmente desenvolvido por Francis [1]. A partir de seus postulados, pode-se escrever a equação (2.1):

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{i_a}{v_a} \frac{dv_a}{dt} + i_a (\mu v_a^2 - \beta) \quad (2.1)$$

onde: β e μ = Constantes de proporcionalidade;

i_a = Corrente instantânea do arco;

v_a = Tensão instantânea do arco.

Peek e Spencer [2], baseando-se nos postulados de Francis, estabeleceram um novo postulado que descreve as características do arco elétrico, ou seja:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{i_a}{v_a} \frac{dv_a}{dt} + \frac{v_a i_a f(v_a)}{F} - i_a \beta \quad (2.2)$$

onde: F = Constante de proporcionalidade.

Analogamente aos dois modelos anteriores, Hiroshi Bô e Kazuyoshi Masumi [3], obtiveram através de melhorias introduzidas:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{i_a^2}{v_a} (B_1 v_a^2 - B_2) + \frac{i_a}{v_a} \frac{dv_a}{dt} \quad (2.3)$$

onde: B_1 e B_2 = Constantes de proporcionalidade.

Adicionalmente aos modelos anteriores, o modelo desenvolvido originalmente por Acha e Outros [4], fundamenta-se no princípio da conservação de energia no arco. A reprodução das características físicas do arco é fundamentalmente distinta dos modelos anteriores, onde, através do equilíbrio de energia, obtém-se a seguinte equação para o arco:

$$\frac{di_a}{dt} = C_1 i_a v_a^2 - C_2 i_a + \frac{i_a}{v_a} \frac{dv_a}{dt} \quad (2.4)$$

onde: C_1 e C_2 = Constante de proporcionalidade.

3.0 - DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DE PROPORCIONALIDADE

A metodologia utilizada para a obtenção da constante μ , do modelo de Francis, baseia-se nas seguintes condições e hipóteses descritas a seguir:

Empregando a situação de equilíbrio dinâmico do arco, a tensão e a corrente passando pelo zero no mesmo instante, tem-se: $i_a = 0$ quando $v_a = 0$, ou vice-versa.

Conseqüentemente, tem-se que: $\frac{dv_a}{dt} = 0$ quando

$$\frac{di_a}{dt} = 0.$$

Reescrevendo portanto a equação (2.1), obtém-se:

$$\mu = \frac{\beta}{V_a^2} \quad (3.1)$$

onde: V_a = Tensão do arco correspondente a corrente de pico do arco.

As equações (2.1), (2.2) e (3.1), apresentam a constante de proporcionalidade β . Baseando-se na Referência [2], uma metodologia empregando resultados experimentais com duas situações de ensaios, foram modificadas e adaptadas, para as diversas cargas utilizadas para a avaliação dos modelos descritos anteriormente, ou seja:

1) Tensão de alimentação nominal nas cargas, para a determinação do valor β ;

2) Tensão de alimentação reduzida nas cargas, para a determinação de um novo valor de β , denominado nesta condição por β_1 .

Estas condições de ensaios tornam-se necessárias para a obtenção de um sistema de equações, a partir de resultados experimentais, com o objetivo de determinação das constantes presentes nos modelos das Referências [3] e [4].

Recorrendo-se a Referência [2], em que a condutância do arco é proporcional a densidade de elétrons dividida pela constante F ; pode-se concluir que: a curva da condutância do arco é igual a curva da densidade de elétrons dividida pela constante F , para cada instante.

Assim, da característica de que a derivada de uma função é igual a tangente à curva desta função no ponto, e de [2], pode-se escrever:

$$\beta = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \left(\frac{-1}{Fy} \right) \left(\frac{-Fy}{x} \right) = \frac{1}{x} \quad (3.2)$$

onde: F = Constante de proporcionalidade;

n = Densidade de elétrons instantânea do arco;

x, y = Coordenadas representando o tempo e condutância, nas Figuras 1 e 2.

Portanto as Figuras 1 e 2, a título de ilustração, mostram as duas situações de ensaios experimentais, para uma lâmpada fluorescente de 40W, e também, parte da metodologia utilizada para o cálculo de β e β_1 , conforme descrito acima.

Retornando-se à equação (2.2), da Referência [2], uma metodologia para a determinação da função $f(v_a)$ é proposta. Esta função é usada para a representação da forma de onda da tensão do arco:

$$f(v_a) = \sum_{i=1}^n A_i v_a^{2i-1} \quad (3.3)$$

Utilizando-se uma aproximação de dois termos na série de potências, obtém-se a expressão para o cálculo de $f(v_a)$:

$$f(v_a) = A_1 v_a + A_2 v_a^3 \quad (3.4)$$

onde: A_1 e A_2 = Constantes da série de potências.

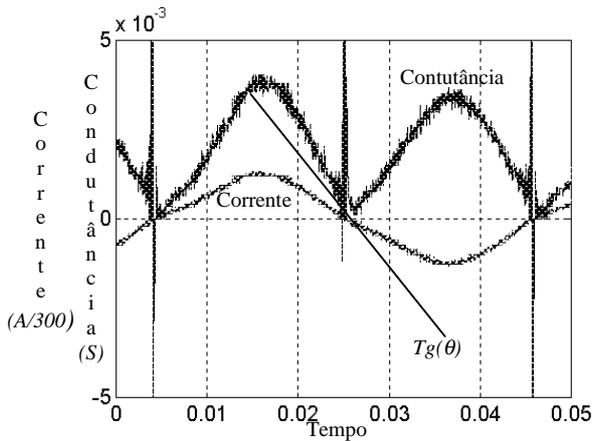


FIGURA 1 - Corrente e condutância resultantes do ensaio com tensão nominal.

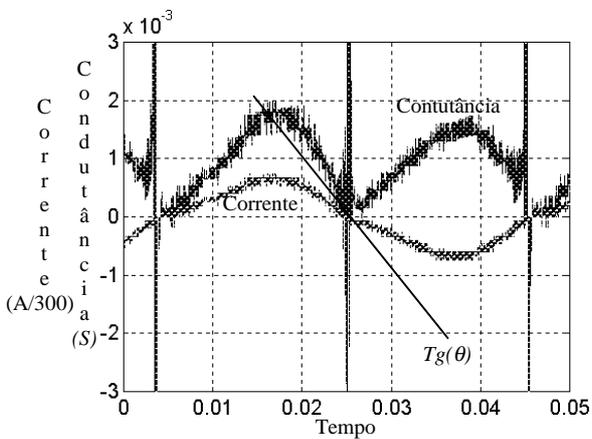


FIGURA 2 - Corrente e condutância resultantes do ensaio com tensão reduzida.

Dividindo-se a expressão da série de potência pela constante de proporcionalidade F , obtém-se de (3.4), a seguinte expressão:

$$\frac{f(v_a)}{F} = \frac{A_1}{F} v_a + \frac{A_2}{F} v_a^3 \quad (3.5)$$

Também, da equação (2.2), considerando-se para o instante em que $\frac{di_a}{dt} = 0$ e $\frac{dv_a}{dt} = 0$, e integrando-a com a substituição de (3.5) nesta, obtém-se:

$$\frac{A_1}{F} \int_0^{\frac{T}{2}} v_a^2 dt + \frac{A_2}{F} \int_0^{\frac{T}{2}} v_a^4 dt = \beta \frac{T}{2} \quad (3.6)$$

A metodologia para a determinação das constantes $\frac{A_1}{F}$ e $\frac{A_2}{F}$, como descrita anteriormente resulta em sistema de equações obtido a partir da equação (3.6), ou seja::

$$\frac{A_1}{F} V_{a1} + \frac{A_2}{F} V_{a2} = \beta \frac{T}{2} \quad (3.7)$$

$$\frac{A_1}{F} V_{a3} + \frac{A_2}{F} V_{a4} = \beta_1 \frac{T}{2} \quad (3.8)$$

onde: V_{a1} e V_{a2} = Resultado das integrais da tensão do arco em condições operacionais com tensão nominal, obtidas pelo método trapezoidal, das formas de ondas na figura 3.3;

V_{a3} e V_{a4} = Idem para a tensão reduzida.

Para a solução do sistema de equações (3.7), (3.8), utiliza-se as duas condições de ensaios citados anteriormente. A Figura 3 mostra as condições operativas mencionadas para o caso típico de uma lâmpada fluorescente de 40W.

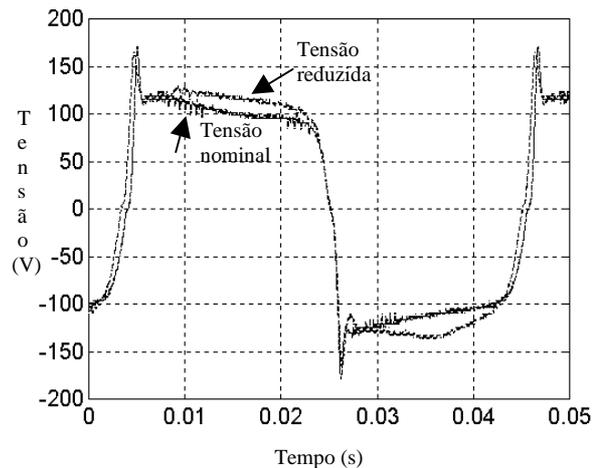


FIGURA 3 - Formas de onda das tensões resultantes dos ensaios.

Na solução das equações (2.3) e (24), representativas dos modelos de Hiroshi Bô e Acha, fundamentou-se

nas condições de ensaios semelhantes às usadas para a obtenção das constantes nos casos anteriores.

Neste sentido, utilizando-se as curvas das condutâncias levantadas experimentalmente, ilustradas nas Figuras 1 e 2, e a característica de que a derivada de uma função em um ponto qualquer é igual a uma constante, as equações (2.3) e (2.4), fornecem dois sistemas de equações para a determinação das constantes presentes:

$$B_1 I_a^2 - B_2 \frac{I_a^2}{V_a^2} = \beta \quad (3.9)$$

$$B_1 I_{a_1}^2 - B_2 \frac{I_{a_1}^2}{V_{a_1}^2} = \beta_1 \quad (3.10)$$

$$C_1 I_a V_a - C_2 \frac{I_a}{V_a} = \beta \quad (3.11)$$

$$C_1 I_{a_1} V_{a_1} - C_2 \frac{I_{a_1}}{V_{a_1}} = \beta_1 \quad (3.12)$$

onde: I_a = Corrente de pico para a tensão nominal;

I_{a_1} = Corrente de pico para a tensão reduzida;

V_a = Tensão proporcional a corrente de pico com tensão nominal;

V_{a_1} = Idem para a tensão reduzida.

4.0 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM OS EXPERIMENTAIS

Para a identificação das cargas usadas e comparação dos resultados obtidos das modelagens com os experimentais, as análises encontram-se enumeradas, conforme Tabela 1:

TABELA 1 - Enumeração dos casos estudados.

Discriminação dos casos	
Caso	Tipo de carga
1	Lâmpada fluorescente compacta de 9W
2	Lâmpada fluorescente convencional de 20W
3	Lâmpada fluorescente convencional de 40W
4	Lâmpada fluorescente convencional de 110W
5	Lâmpada vapor de mercúrio de 125W
6	Lâmpada fluorescente vapor de sódio de 250W
7	Máquina de solda a arco elétrico 7kW

Com o arco para cada carga em condições operacionais nominais e em equilíbrio dinâmico, os resultados experimentais e computacionais, utilizando-se o Matlab, geraram as formas de ondas necessárias a avaliação de [1], [2], [3] e [4].

Objetivando-se a validação complementar dos modelos, desenvolveu-se a decomposição harmônica das formas de onda da corrente e tensão do arco, adquiridas experimentalmente e através da simulação digital dos modelos. Para a realização de cálculos específicos de DHT de cada forma de onda experimental e simulada para a corrente e tensão do arco, os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 2 e 3, a seguir:

TABELA 2 - Distorção harmônica total das ondas de tensão e corrente.

Mod.	Experimental		Francis		Peek e Spencer	
	V(%)	I(%)	V(%)	I(%)	V(%)	I(%)
Harm.						
Dist. Caso1	60,64	9,14	61,25	9,96	61,13	8,50
Dist. Caso2	43,37	7,99	45,53	8,06	41,95	8,54
Dist. Caso3	40,79	10,14	37,08	9,79	38,16	9,93
Dist. Caso4	42,41	12,46	39,94	12,41	41,07	12,43
Dist. Caso5	37,03	10,69	37,66	11,43	38,03	10,45
Dist. Caso6	52,50	8,93	47,87	9,07	47,81	9,51
Dist. Caso7	38,80	6,75	42,57	6,83	40,02	6,84

TABELA 3 - Distorção harmônica total das ondas de tensão e corrente.

Mod.	Experimental		Hirochi e Kazuyoshi		Acha e Outros	
	V(%)	I(%)	V(%)	I(%)	V(%)	I(%)
Harm.						
Dist. Caso1	60,64	9,14	61,63	9,93	64,13	9,44
Dist. Caso2	43,37	7,99	41,94	8,50	47,56	7,35
Dist. Caso3	40,79	10,14	42,57	10,99	44,49	9,89
Dist. Caso4	42,41	12,46	44,36	12,44	45,09	12,52
Dist. Caso5	37,03	10,69	38,43	10,22	38,04	10,33
Dist. Caso6	52,50	8,93	47,71	8,13	49,96	8,12
Dist. Caso7	38,80	6,75	42,23	6,30	42,05	7,28

Observa-se das tabelas acima que, os modelos apresentaram DHT's para a forma de onda da corrente e da tensão do arco próximas às DHT's obtidas experimentalmente para cada um dos casos analisados.

Adicionalmente uma alternativa de análise da avaliação dos modelos é através da comparação dos erros processados na obtenção de DHT's de tensão e corrente. Esta análise fundamenta-se no cálculo do erro entre a DHT da onda obtida por simulação e a DHT da onda adquirida experimentalmente tanto para tensão como para corrente.

Assim, as Tabelas 4 e 5; e as Figuras 4 e 5 a seguir, apresentam os resultados obtidos.

Dos resultados apresentados, observa-se que, para todos os casos os modelos apresentaram erros desprezíveis em alguns casos e, razoáveis em outros, tanto para a corrente do arco como também para a tensão do arco.

TABELA 4 - Comparação dos erros de DHT entre a simulação dos modelos e os ensaios experimentais das cargas ensaiadas.

Mod.	Francis		Peek e Spencer	
	$\epsilon V(\%)$	$\epsilon I(\%)$	$\epsilon V(\%)$	$\epsilon I(\%)$
Caso 1	1,00	8,97	0,81	7,00
Caso 2	4,98	1,00	3,27	6,88
Caso 3	9,10	3,45	2,69	2,07
Caso 4	5,82	0,40	3,16	0,24
Caso 5	1,70	6,92	2,70	2,25
Caso 6	8,82	1,57	8,93	6,49
Caso 7	9,72	1,19	3,14	1,33

TABELA 5 - Comparação dos erros de DHT entre a simulação dos modelos e os ensaios experimentais das cargas ensaiadas.

Mod.	Hirochi e Kazuyoshi		Acha e Outros	
	$\epsilon V(\%)$	$\epsilon I(\%)$	$\epsilon V(\%)$	$\epsilon I(\%)$
Caso 1	1,63	8,64	5,76	3,28
Caso 2	3,29	6,38	9,66	8,00
Caso 3	2,34	8,33	9,07	2,76
Caso 4	4,60	0,16	6,32	0,48
Caso 5	3,78	4,39	2,73	3,37
Caso 6	9,12	8,95	4,84	9,07
Caso 7	8,84	6,67	8,38	7,85

Observa-se também que o modelo de Francis apresentou erros ligeiramente maiores para a corrente do arco nos casos 1 e 5, e para a tensão do arco nos casos 3, 4, 6 e 8. Já o modelo Peek e Spencer, nos casos 1, 2 e 6, para a corrente do arco, apresentam erros também maiores, porém destaca-se que, para a tensão o erro mais significativo foi apresentado no caso 6. Da análise dos erros do modelo de Hirochi, pode-se dizer que este apresentou erros maiores para a corrente do arco em quase todos os casos, exceto nos casos 4 e 6, e contudo, para a tensão do arco diferindo-se muito pouco do experimental nos casos 6 e 7. Analisando-se os erros do modelo de Acha, pode-se afirmar que, as ondas da corrente do arco geradas distanciaram-se ligeiramente pouco das obtidas através dos ensaios experimentais nos casos 2, 6 e 7 e, para a tensão somente nos casos 5 e 6 geraram erros desprezíveis.

5.0 - CONCLUSÕES

No processo de avaliação dos resultados apresentados pelos erros processados e, demonstrados nas Tabelas 4 e 5; e das Figuras 4 e 5, considera-se como aceitáveis, os inferiores a 5%.

Observa-se da análise dos modelos, que estes, deveriam comportar-se semelhantemente para todos os casos. Isto não ocorre devido aos refinamentos necessários à determinação das constantes β , de cada caso, e as limitações impostas no laboratório para as condições operativas reais das cargas.

A aplicação de outras metodologias na determinação das constantes β , na busca de refinamentos dos modelos, poderão resultar em precisão mais adequada às condições operativas das cargas simuladas.

É essencial enfatizar que, as figuras de Lissajous direcionaram a avaliação dos modelos, pois, as mesmas demonstraram com maior clareza a não linearidade do comportamento instantâneo entre a corrente e a tensão do arco. Por outro lado, é importante observar que outras comparações e análises citadas acima complementam o desempenho dos modelos. Em linhas gerais, as conclusões que podem ser destacadas neste artigo através das figuras de Lissajous, para os modelos e todos cálculos inerentes a eles, é que estes apresentaram melhores resultados para os casos propostos da seguinte forma:

- Caso 1 - Hirochi e Acha;
- Caso 2 - Francis e Peek;
- Caso 3 - Francis, Peek, Hirochi e Acha;
- Caso 4 - Francis, Peek, Hirochi e Acha;
- Caso 5 - Francis, Peek, Hirochi e Acha;
- Caso 6 - Francis, Peek, Hirochi e Acha;
- Caso 7 - Peek e Hirochi;

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Francis, V. J., "Fundamentals of discharge the circuits", Ed. John Wiley & Sons, New York, N. Y., E.U.A., 1948.
- [2] - Peek, S. C., Spencer, D. E., "A differential equation for the fluorescent lamp", *IES Transaction*, April 1968, pp. 157-166.
- [3] - Bô H., Masumi K., "Analysis of operating circuits for discharge lamps by the simulation method", *IES Transaction*, April 1975, pp. 92-98.
- [4] - Acha E., Semlyen A., Rajakvic N., "A harmonic domain package for nonlinear problems and its application to electric arcs", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1390-1396.
- [5] - Emanuel A. E., Peretto L., "The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 289-295.

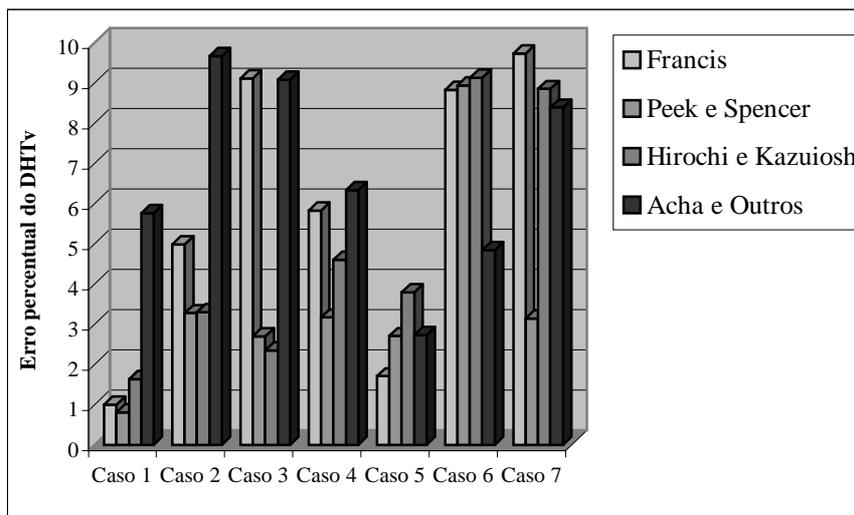


FIGURA 4 - Gráfico comparativo dos erros de DHTs, para a tensão.

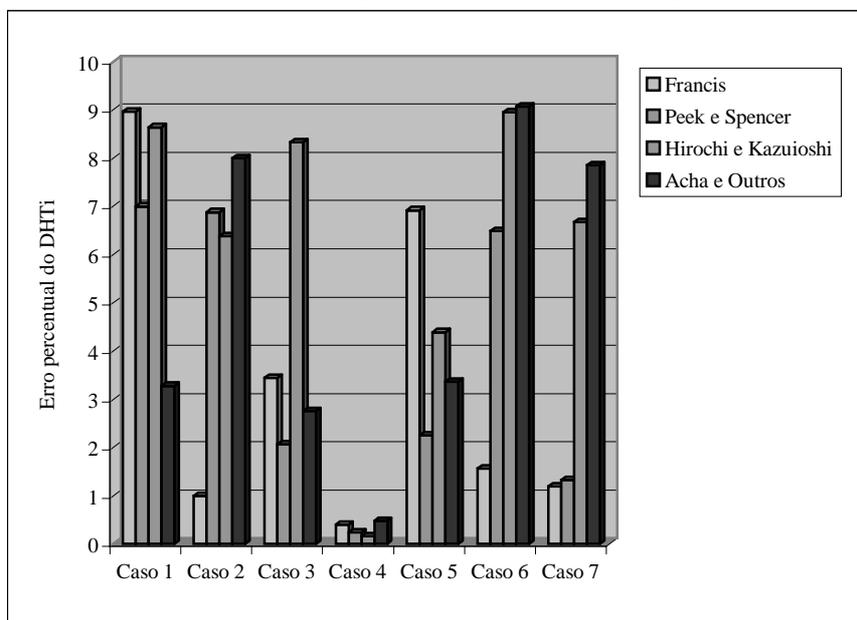


FIGURA 5 - Gráfico comparativo dos erros de DHTs, para a corrente.

- [6] - Laskowski E. L., Donoghue J. F., Acha E., Semlyen A., Rajakvic N., "A model of a mercury arc lamps terminal v-i behavior", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 1A-17, No. 4, July/August 1981, pp. 419-426.
- [7] - Phillip R. H., "Mathematical models for high-intensity discharge lamps", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 1A-16, No. 5, September/October 1980, pp. 648-654.
- [8] - Gluskin, E., "Discussion of the voltage/current characteristic of a fluorescent lamp", *IEE Proc. A.*, 1989, 136, (5), pp. 229-232.
- [9] - Gluskin, E., "On the theory of fluorescent lamp circuits", *IEEE Proceedings*, Vol. 137, Pt. A, No. 4, July 1990, pp. 201-208.
- [10] - Gluskin E., "High harmonic currents in fluorescent lamp circuits", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 26, No. 2, March/April 1990, pp. 347-351.
- [11] - Verderber R. R., Morse. C., Alling W. R., "Harmonics from compact fluorescent lamps", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 29, No. 3, May/June 1993, pp. 670-674.
- [12] - Schelb, Antônio José H. C., "Modelagens de cargas não lineares: lâmpadas de descarga e máquinas de solda", Dissertação de Mestrado, UFU, 2000.