

# Análise Harmônica em Sistemas Elétricos Ideais e Não-Ideais

J. P. G. Abreu, H. Arango, F. N. Belchior

**Resumo**--Este artigo busca agregar informações importantes e essenciais relacionadas a sistemas elétricos ideais e não-ideais. Neste sentido, as análises são apresentadas na forma teórica, seguida de exemplos práticos tipicamente encontrados em medições de campo. Na prática existem estruturas de harmônicos associados a equipamentos tais como retificadores não-controlados, motores e geradores, etc. Estas estruturas definem harmônicos característicos à operação normal, e que por vezes se encontram associados em pares. Dependendo do grau de semelhança entre os membros do par, esses harmônicos foram denominados usando um símil biológico, com uni e bivitelinos. De modo análogo, há diferenças na fase de harmônicos de mesma ordem, que podem ser qualificados segundo uma analogia química, em básicos e ácidos. A estrutura mencionada se manifesta nos próprios equipamentos. Assim, por exemplo, há harmônicos rotóricos, estatóricos e de enrolamentos amortecedores que se associam com as categorias uni e bivitelinas, antes definidas.

**Palavras-Chaves**-- Analogia química, cargas não-lineares, qualidade da energia elétrica, símil biológico, sistemas elétricos não-ideais.

## I. INTRODUÇÃO

A Teoria das Coordenadas Simétricas viabiliza a discriminação de grandezas trifásicas senoidais em componentes associadas às três seqüências de fase: Positiva, Negativa e Nula (Fig. 1). Estas componentes são ortogonais e permitem simplificar muito a solução de sinais senoidais não equilibradas.

Com o advento de equipamentos de eletrônica de potência, que são inerentemente não lineares, as formas de onda senoidais tornam-se distorcidas e passam a conter harmônico em adição à fundamental. Ora, toda vez que um harmônico trifásico se apresente desequilibrado, cabe analisa-lo através de suas componentes simétricas com benefícios semelhantes aos que se obtêm na senóide fundamental [1]-[3].

Este trabalho pretende enfatizar esta forma de tratamento de um modo orgânico, enfatizando as propriedades gerais, mas sem perder de vista a interpretação física e a aplicação em problemas concretos e relevantes da engenharia elétrica.

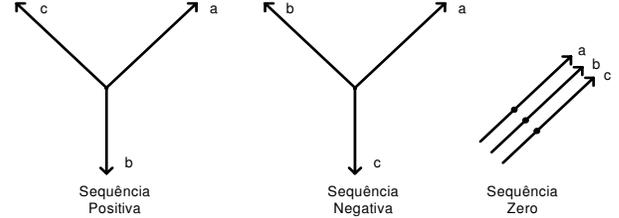


Fig. 1. Componentes de seqüência de fase.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para ondas trifásicas periódicas é possível usar o Teorema de Fourier, expressando o vetor dos valores instantâneos ( $\underline{v}(t)$ ) em função da senóide fundamental ( $h=1$ ) e dos harmônicos ( $h > 1$ ), podendo ser representada por (1):

$$\underline{v}(t) = \sqrt{2} \operatorname{IM} \left( \sum_{h=1}^{\infty} \underline{\dot{V}}_h e^{jh\omega t} \right) \quad (1)$$

Os vetores fasoriais ( $\underline{\dot{V}}_h$ ) são, no caso geral, desequilibrados, logo podem ser decompostos em componentes de seqüência ( $\underline{\dot{E}}_h$ ) segundo (2):

$$\underline{\dot{V}}_h = \underline{\underline{K}} \underline{\dot{E}}_h \quad (2)$$

Onde  $\underline{\underline{K}}$  é a matriz de transformação para coordenadas simétricas (positiva, negativa e zero) devida a Kennelly e Fortescue. [4], [5].

## III. SIMETRIA

A idéia de simetria no caso senoidal está expressa nas seqüências de fase positiva, negativa e nula. Se o tipo de seqüência for indicado pelo índice  $\sigma=(1, 2, 0)$ . A simetria de cada seqüência pode exprimir-se como um “padrão repetitivo  $\sigma$ ” representado em (3):

$$v_a(t) = v_b \left( t + \frac{\sigma T}{3} \right) = v_c \left( t + \frac{2\sigma T}{3} \right) \quad (3)$$

Estas igualdades independem do caráter senoidal das ondas ( $v_a, v_b, v_c$ ) e podem ser usadas para definir a simetria no caso mais geral de ondas distorcidas. Quando se tratam de grandezas distorcidas e, portanto com harmônicos, não é possível identificar a simetria com apenas uma particular seqüência de fases.

Entretanto, surge uma interessante questão: como se relaciona a simetria de uma onda distorcida com as seqüências de fase dos seus harmônicos?

Mostra-se que, se uma grandeza trifásica não senoidal tiver simetria Positiva, o seu harmônico  $h$  deverá ser de seqüência.

$$s = h \Big|_3 \quad (4)$$

Onde  $h \Big|_3$  ( $h$  – Módulo 3) é o resto de dividir o produto  $h$  por 3.

Assim o quinto harmônico terá seqüência  $5 \Big|_3 = 2$ , isto é, negativa.

A questão da simetria de ondas distorcidas tem a ver com muitas situações práticas. Por exemplo, uma boa parte das cargas não-lineares é balanceada, ou seja, quando se aplica uma tensão com simetria Positiva, as mesmas reagem absorvendo corrente também simétrica positiva. Por exemplo, retificadores trifásicos de 6 pulsos, quando operando corretamente, comportam-se como cargas balanceadas.

Caso aconteça alguma disfunção, como assimetrias nos pulsos de disparo, o retificador deixa de agir como carga balanceada e sua corrente perde a simetria. Isto pode ser detectado pelo aparecimento de componentes harmônicas de seqüência que não correspondem à (4). Por exemplo, um 5º harmônico contendo seqüência positiva.

É natural que a essência da fundamental seja a seqüência positiva, da 2ª harmônica a negativa, da 3ª a zero e assim por diante.

#### IV. AGREGAÇÃO DE HARMÔNICOS

Dado um conjunto, ou *cluster*, de cargas poluidoras, os harmônicos resultantes dependem da distribuição dos ângulos de fase nos harmônicos individuais. Estes ângulos diferem tanto pela distinção entre as cargas quanto dos pontos de conexão.

Adotando o ângulo médio como referência, tal como está apresentado na Fig. 2, as cargas a um lado resultam “opostas”, em certa proporção, àquelas no outro lado. À imagem dos compostos químicos, alguns harmônicos são básicos e outros ácidos, havendo uma neutralização mútua tanto maior quanto mais extremas sejam a basicidade e a acidez,  $\text{pH}=14$  e  $\text{pH}=0$ , consomem-se mutuamente e equivalem a  $180^\circ$  em diferença angular.

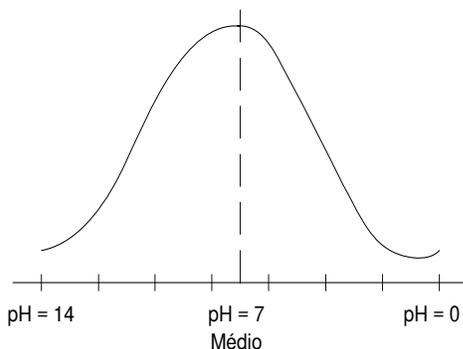
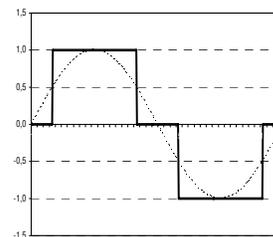


Fig. 2. Distribuição da fase angular.

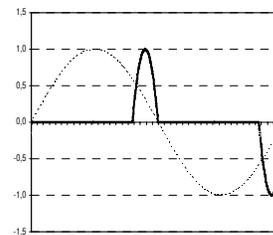
A título de ilustração, a Fig. 3 apresenta os resultados obtidos a partir da análise de um circuito paralelo composto de um reator saturado e um retificador trifásico de 6 pulsos não-controlado, ambos geradores de harmônicos [6]. É possível verificar a eliminação da 5ª harmônica, podendo, dessa maneira, dizer que a 5ª ordem do reator saturado se comportou como harmônico ácido (ou básico), enquanto que a 5ª ordem do retificador como harmônico básico (ou ácido).



(a) Retificador

$h$	$I_{Ret}$ (%)	$\Phi$ (graus)
1	1,10	100,0
3	0	0
5	0,22	19,8
7	0,16	14,4
9	0	0
11	0,10	8,9
13	0,09	7,8

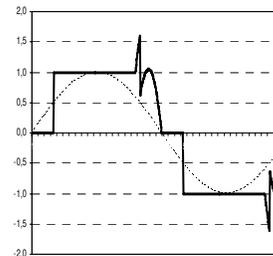
(b) DHT=27,2 %



(c) Reator Saturado

$h$	$I_{Reator}$ (%)	$\Phi$ (graus)
1	0,27	100
3	0,25	92,2
5	0,21	77,8
7	0,16	59,2
9	0,10	39,4
11	0,06	21,0

(d) DHT=141,7%



(e) Alimentação

$h$	$I_{Alim}$ (%)	$\Phi$ (graus)
1	1,22	100,0
3	0,26	21,3
5	0,00	0,4
7	0,10	8,6
9	0,11	8,9
11	0,10	7,8

(f) DHT=26,5%

Fig. 3. Formas de onda e características de um resultado obtido visando a eliminação da 5ª harmônica (harmônico ácido e base).

#### V. HARMÔNICOS UNIVITELINOS E HARMÔNICOS BIVITELINOS

Considerando-se, novamente o caso dos retificadores trifásicos não-controlados de ‘p’ pulsos, verifica-se que os harmônicos de corrente ficam limitados às ordens da forma  $pk \pm 1$ , sendo  $p$  o número de pulsos e  $k=1, 2, 3, \dots$ . O uso de um múltiplo ( $n$ ) de 6 pulsos convenientemente sincronizados restringe ainda mais a distorção:  $h=6nk \pm 1$ , sendo  $n=1, 2, 3, \dots$ . Note-se que os harmônicos são ímpares e aparecem em duplas centradas nas frequências  $6nk$ . Os harmônicos de cada dupla, apesar de originar-se na mesma frequência, são de ordens diferentes e exibem seqüências distintas. Em uma analogia biológica, podem ser enxergados como bivitelinos.

Sobre suas características de funcionamento, é importante destacar que, sob condições idealizadas do sistema alimentador, bem como a existência de uma indutância infinita nos terminais de saída, a corrente média no lado CC é constante de valor  $I_d$ . Nestas condições, as correntes de alimentação do lado CA serão formadas por blocos

retangulares de amplitude  $\pm I_d$ . A Fig. 4 evidencia a forma de onda típica e idealizada da corrente de linha de alimentação ( $I_{Ret}$ ) e a respectiva tensão de alimentação (V) para um retificador de 6 pulsos.

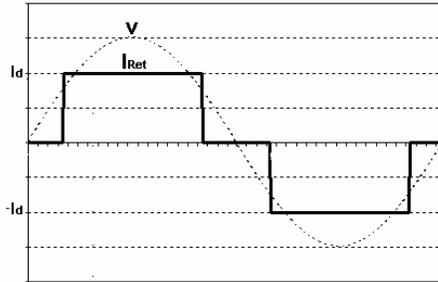


Fig. 4. Corrente de linha no retificador de 6 pulsos.

Tomando-se a tensão fase A – neutro (V) como referência para o cálculo das componentes harmônicas da corrente de linha, verifica-se que:

- $I_{Ret}(t)$  é uma função ímpar, portanto,  $a_h$  são nulos e os ângulos de fase serão  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , dependendo do sinal de  $b_h$ .

A Fig. 5 fornece o espectro de amplitudes (%) e de ângulos de fase das correntes harmônicas associadas.

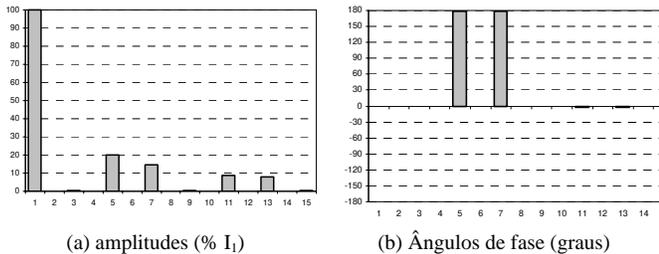


Fig. 5. Análise harmônica da corrente do retificador.

## VI. HARMÔNICOS ESTATÓRICOS E HARMÔNICOS ROTÓRICOS

Um gerador síncrono alimentando um destes retificadores é afetado pela circulação destes harmônicos pelo estator da máquina, dando origem a campos magnéticos rotativos. O campo do harmônico  $h=7$ , com seqüência positiva, gira com frequência mecânica  $\Omega_7 = +7\omega_1$  e o  $h=7$ , com negativa, o faz com  $\Omega_5 = -5\omega_1$ .

Os campos refletem-se no rotor, que gira com  $\Omega_R = \omega_1$  com os harmônicos  $\Omega_7 - \Omega_R = 7\omega_1 - \omega_1 = 6\omega$  e  $\Omega_5 - \Omega_R = -5\omega_1 - \omega_1 = -6\omega$ . Trata-se de uma dupla com a mesma ordem  $h=6$ , mas não formam o mesmo átomo, pois são de seqüências opostas. Os dois átomos seriam, na notação adotada, univitelinos.

Os motores de Indução podem ter sua operação afetada pela presença destes harmônicos, que resultaria em uma operação indevida na forma de: [7]-[9]

- Partida do motor;
- Ponto de operação de regime permanente;
- Torque médio;
- Torque oscilatório (vibração).

Sendo:

- $T_{1,1}$  torque fundamental no eixo produzido pela interação entre  $v_1$  com  $i_1$ ;

$$T_{1,1} = k \times \phi_1 \times I_{R1} \times \text{sen}(\theta_{1,1}) = C^{te} \quad (5)$$

- $T_{n,n}$  torque harmônico no eixo produzido pela interação entre  $v_n$  com  $i_n$ ;

$$T_{n,n} = k \times \phi_n \times I_{Rn} \times \text{sen}(\theta_{n,n}) = C^{te} \cong 0 \quad (6)$$

- $T_{n,1}$  ( $T_{1,n}$ ) torque resultante no eixo produzido pela interação entre  $v_n$  com  $i_1$  (ou  $v_1$  com  $i_n$ );

$$T_{1,n} = k \times \phi_1 \times I_{Rn} \times \text{sen}(\theta_{1,n}) = C^{te} \quad (7)$$

$$T_{n,1} = k \times \phi_n \times I_{R1} \times \text{sen}(\theta_{n,1}) = 0 \quad (8)$$

Onde:  $\theta_{1,n} = \theta_0 + (n \pm 1)\omega_1$  ou  $(n \pm 1)\omega_1$

As análises de torque podem ser visualizadas através da Fig. 7, onde se observa que:

- Utiliza-se o sinal '-' para harmônicos de seqüência negativa;
- Utiliza-se o sinal '+' para harmônicos de seqüência positiva;
- Frequência do torque de 5º harmônico = 360 Hz (6º harmônico);
- O torque fundamental é o dominante e se apresenta com um valor constante para cada carga acionada;
- O torque harmônico  $T_{n,n}$ , embora se apresente com um nível constante, devido a  $\phi_n \ll \phi_1$  e  $I_{Rn} < I_{R1}$ , tem-se que seu valor é muito pequeno;
- O torque de oscilação  $T_{1,n}$  tem amplitude determinada por  $\phi_1$  e  $I_{Rn}$  e oscila em uma frequência definida por  $(n \pm 1)\omega_1$ . Adicionalmente a amplitude do torque de oscilação é independente do carregamento mecânico do motor. Este fato resulta que o efeito de  $T_{1,n}$  é mais pronunciado sobre condições de carga leve.

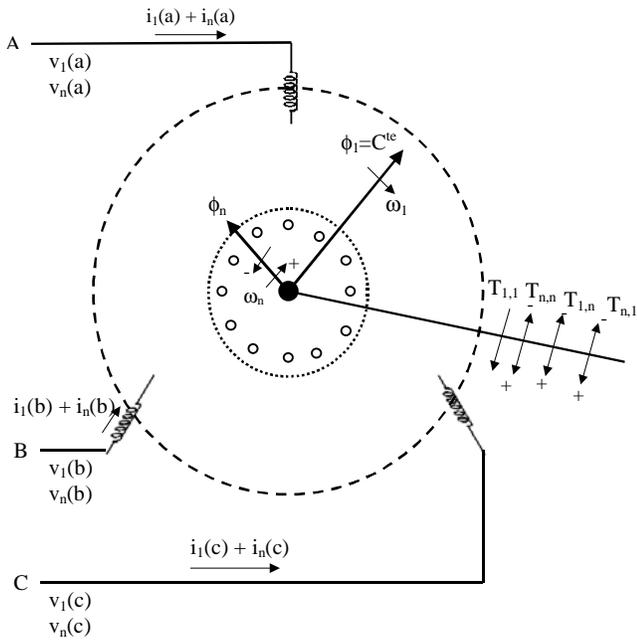


Fig. 7. Representação da influência dos torques harmônicos na rotação nominal de uma máquina elétrica.

Como forma de verificar computacionalmente a influência dos torques harmônicos no funcionamento das máquinas elétricas, um gerador síncrono foi submetido a uma carga não-linear (retificador de 6 pulsos) e uma carga desequilibrada, a qual provoca um fator de desequilíbrio de tensão de 5%. A Fig. 8 ilustra tal situação [10]:

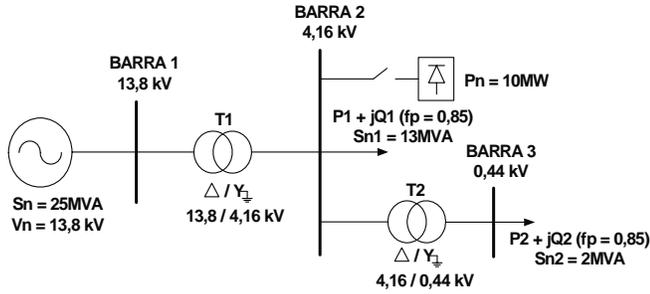


Fig. 8. Circuito elétrico montado para a análise harmônica em geradores síncronos.

Obteve-se, da simulação computacional, as formas de onda das tensões e correntes na saída do gerador, da excitação e das correntes nos enrolamentos amortecedores de eixo d e q.

A. Resultados Obtidos na Armadura

As Figs. 9a e 9b apresentam as formas de ondas das tensões de linha e os respectivos espectros harmônicos referentes à armadura do gerador síncrono.

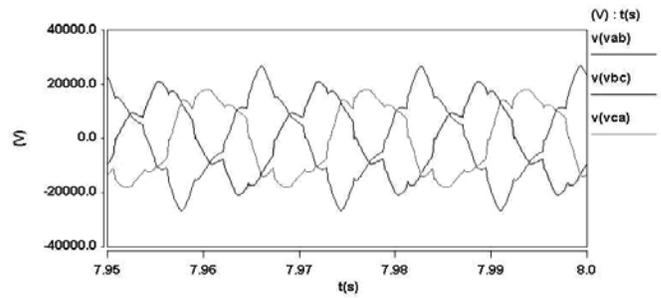


Fig. 9a. Tensões de linha na armadura da máquina síncrona.

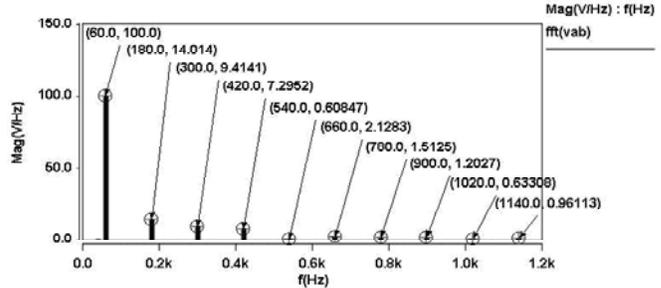


Fig. 9b. Espectro harmônico da tensão de linha (vab) na armadura da máquina síncrona.

Por outro lado, as Figs. 10a e 10b trazem as formas de onda das correntes na armadura, alimentando, da mesma forma, o retificador e a carga desequilibrada. É possível observar o desequilíbrio das correntes, que se apresentam, também, distorcidas. Analisando o espectro harmônico constante na Fig. 9b, nota-se a presença da 3ª harmônica, característica do desequilíbrio e também os efeitos provocados pela ação em conjunto de cargas desequilibradas e cargas não-lineares, onde se observa além dos harmônicos característicos, a presença de harmônicos não-característicos.

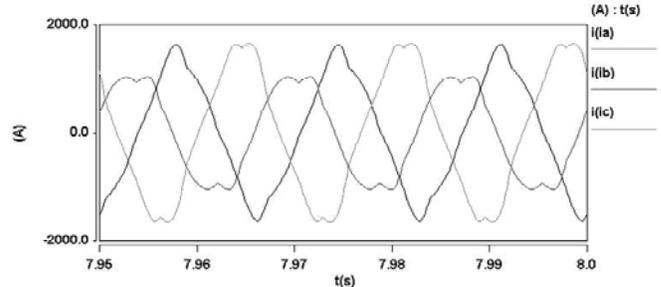


Fig. 10a. Correntes de linha na armadura da máquina síncrona.

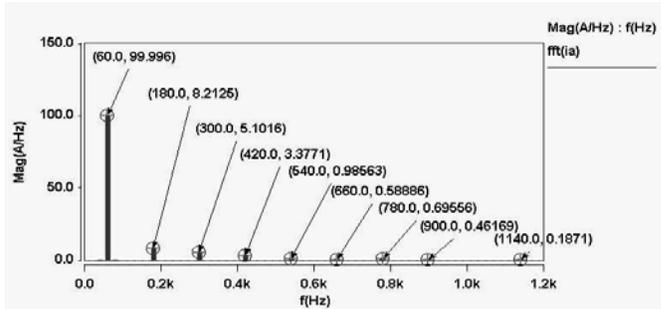


Fig. 10b. Espectro harmônico da corrente de linha na armadura da máquina síncrona.

### B. Resultados Obtidos na Excitação

Similarmente, com a presença do retificador e também da carga desequilibrada, as análises seguintes envolvem a excitação do gerador síncrono. Desta forma, a Fig. 11 ilustra a forma de onda de tensão no mesmo.

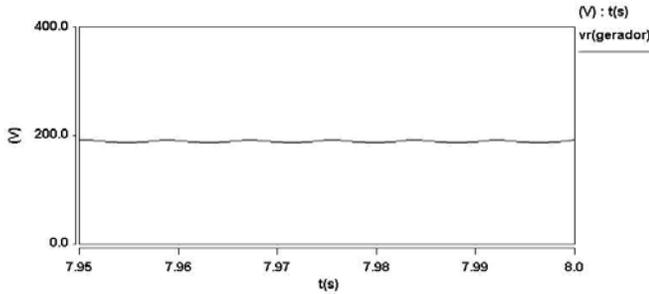


Fig. 11. Tensão no enrolamento de campo da máquina síncrona.

Associadas às respostas de corrente de excitação, as Figs. 12a e 12b ilustram a forma de onda e o seu espectro harmônico respectivamente.

Com o desequilíbrio surge uma componente de 2ª harmônica que, embora de pequena magnitude para o desequilíbrio provocado, faz com que o valor contínuo da corrente de excitação seja acrescido de uma oscilação. Nesta situação, surge uma componente de seqüência negativa provocada pela existência de um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, mas em sentido contrário ao de rotação definido pela seqüência positiva. Sua frequência será igual a duas vezes à da rede, ou seja, de 120 Hz para o nosso caso, que corresponde à harmônica de segunda ordem. No caso anterior, observou-se que a presença de distorções harmônicas nos terminais da máquina, em particular, a de ordem 5 provoca uma componente de 6ª ordem. Verifica-se assim que embora de valores e ordens diferentes, ambos os casos baseiam-se no mesmo princípio físico de funcionamento. Desta forma observa-se uma certa “semelhança” entre as operações desequilibradas e aquelas encontradas quando da operação do alternador na presença de distorções harmônicas.

Neste caso, aparecerão harmônicos superpostos ao seu valor contínuo devido ao desequilíbrio e a característica do retificador.

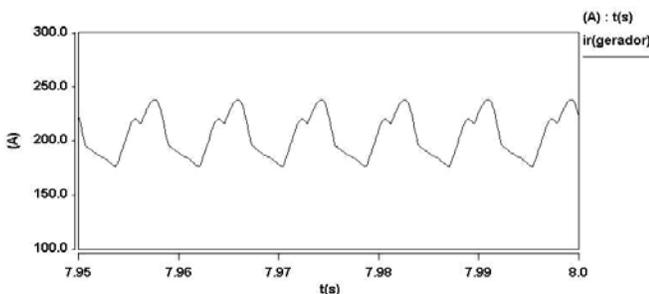


Fig. 12a. Corrente no enrolamento de campo da máquina síncrona.

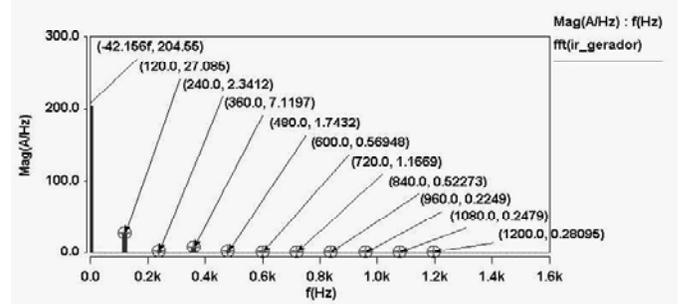


Fig. 12b. Espectro harmônico da corrente no enrolamento de campo da máquina síncrona.

### C. Resultados Obtidos nos Enrolamentos Amortecedores

A Fig. 13a apresenta a forma de onda da corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto quando o gerador alimenta a carga não-linear (retificador) e carga desequilibrada. A Fig. 13b mostra o respectivo espectro harmônico. A justificativa das distorções é a mesma apresentada para a corrente de excitação.

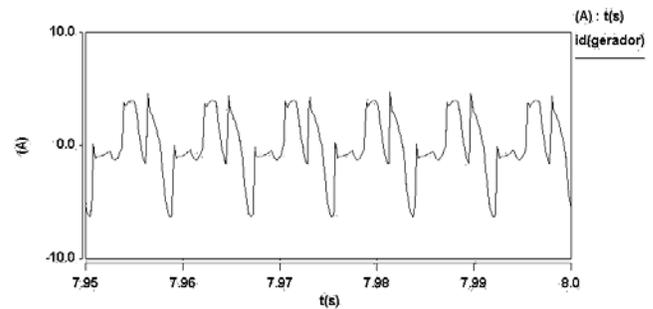


Fig. 13a. Corrente no enrolamento amortecedor de eixo d da máquina síncrona.

Cabe destacar que o enrolamento amortecedor é bastante sensível à circulação de harmônicas.

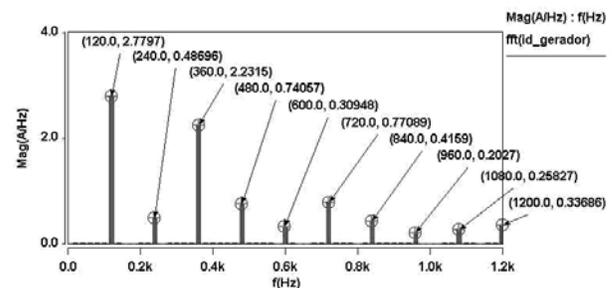


Fig. 13b. Espectro harmônico da corrente no enrolamento amortecedor de eixo d da máquina síncrona.

Para o enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, as formas de onda da corrente e seu espectro harmônico são dados pelas Figs. 14a e 14b, respectivamente. Neste enrolamento irá ocorrer o mesmo efeito que para o enrolamento amortecedor de eixo direto.

Os comentários e as análises para o enrolamento amortecedor são análogos aos já realizados para a excitação da máquina.

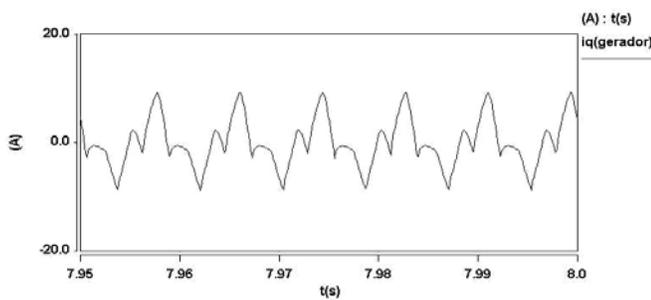


Fig. 14a. Corrente no enrolamento amortecedor de eixo q da máquina síncrona.

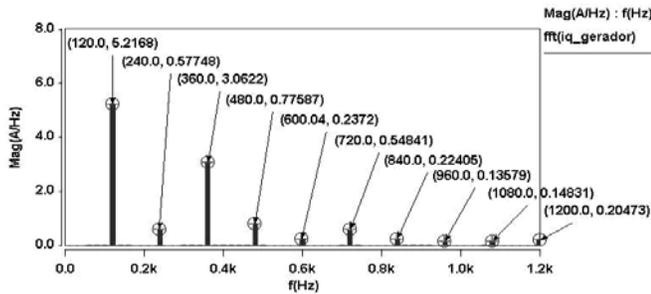


Fig. 14b. Espectro harmônico da corrente no enrolamento amortecedor de eixo q da máquina síncrona.

## VII. CONCLUSÕES

Este artigo, voltado a agregar informações importantes e essenciais relacionadas a sistemas elétricos ideais e não-ideais, busca analisar, de forma analítica e prática, situações reais tipicamente encontradas em medições de campo. São enfocadas situações onde se tem assimetria das grandezas trifásicas, associadas a tensões ou correntes. Diante destas circunstâncias, verifica-se, por exemplo, o aparecimento de harmônicos não-característicos, que por vezes são minimizados ou até cancelados. São apresentados os conceitos de harmônicos ácidos e harmônicos básicos, analogamente à química, harmônicos univitelinos e harmônicos bivitelinos, analogamente à biologia e, bem como, harmônicos estatóricos e harmônicos rotóricos, associados às máquinas elétricas.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. P. G. Abreu, A. E. Emanuel, Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, Nº1, Jan/Feb 2002, pp. 12-20 and in *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, May 2001, pp: 105-114.
- [2] J. P. G. Abreu, A. E. Emanuel, "Induction motors loss of life due to voltage imbalance and harmonics: a preliminary study", *Proceedings of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Vol. 1, Oct. 2000, pp: 75-80.
- [3] J. P. G. Abreu, A. E. Emanuel, "The need to limit subharmonics injection", *Proceedings of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Vol. 1, Oct. 2000, pp:251-253.
- [4] F. A. Furfari, J. Brittain, Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 8, Issue 3, May-June 2002, pp: 7-9.
- [5] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2nd Edition, USA, 2003.
- [6] F. N. Belchior, J. C. Oliveira, L. C. O. Oliveira, "Uma estratégia eletromagnética para redução da injeção de correntes harmônicas através da auto-compensação", XVI Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Out. 2006.

- [7] A. Rocco, "Máquinas síncronas e cargas não lineares, efeitos da distorção harmônica, uma análise numérico-experimental", Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- [8] Battistelli, L., Caramia, P., Carpinelli, G., Proto, D., Power quality disturbances due to interaction between AC and DC traction systems, *IEE Conference Publication*, vol. 2, 2nd International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2004, pp. 492-497.
- [9] S. X. Duarte, "Proposta de indicador de qualidade de tensão a partir do impacto de distorções harmônicas e desequilíbrios sobre motores de indução", Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [10] C. A. L. Rocha, "Comportamento de geradores síncronos trifásicos alimentando cargas desequilibradas, uma abordagem analítica e experimental", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

## IX. BIOGRAFIAS



**José Policarpo Gonçalves de Abreu** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI em 1975. Recebeu o título de Mestre em Ciências também pela EFEI em 1980 e o título de Doutor em Ciências pela Universidade de Campinas - Unicamp em 1991. Desenvolveu o Pós-Doutorado no WPI (Worcester Polytechnic Institute, EUA) em 2000. Prof. Policarpo é Coordenador do GQEE, desde a sua fundação e tem sido consultor da Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - Fupai, bem como tem prestado serviços para ONS, CSPE, ANEEL, Enerq, CED, dentre outros.



**Héctor Arango** graduado em Engenharia Elétrica pela Universidad Nacional Del Sul. Recebeu o grau de Mestre em Ciências pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, no ano de 1990, no qual trabalhou com transformações especiais. Recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP em 1996. Desde 1976 é professor da Universidade Federal de Itajubá. Seu campo de pesquisa e interesse inclui a Qualidade da Energia Elétrica, Legislação do mercado de energia, máquinas elétricas rotativas e transformadores, definições sobre condições não senoidais e análise de risco em mercados de eletricidade.



**Fernando N. Belchior** nasceu em Uberlândia-MG. Recebeu o grau de bacharel, mestrado e doutorado pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor adjunto no Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, Brasil. Suas principais áreas de interesse: qualidade da energia elétrica, motores elétricos e medições elétricas.