

# Filtro LC Paralelo Para Minimização de Correntes de Seqüência Zero em Sistemas de Distribuição Aéreos.

Nilo Sérgio Soares Ribeiro, Milton Itsuo Samesima, José Wilson Resende

**Resumo:**--Este trabalho apresenta o princípio de operação, modelagem, implementação computacional e estudos de desempenho de filtros LC paralelos, em série com o neutro do transformador, objetivando a minimização do fluxo de correntes de seqüência zero em sistemas de distribuição trifásicos aéreos a quatro fios. Neste sentido, este trabalho contempla o emprego da filosofia da ressonância paralela para o bloqueio da corrente de terceira ordem, sendo esta a principal corrente harmônica observada em medições realizadas em um sistema de distribuição real típico. O estudo foi desenvolvido com o auxílio do programa *Alternative Transient Program – ATP*, através da modelagem de um sistema de distribuição, tendo em vista que o referido sistema apresentou problemas com o fluxo excessivo de correntes de seqüência zero no neutro do transformador da subestação de distribuição.

**Palavras-Chaves –** *Alternative Transient Program, Correntes Harmônicas, Filtros Sintonizados, Modelagem, Distorções Harmônicas, Correntes Harmônicas de Seqüência Zero.*

## I. INTRODUÇÃO

Sabe-se que as redes de distribuição primárias trifásicas a quatro fios, multi-aterrados, são largamente empregadas, devido a sua capacidade de prover um perfil de tensão mais estável e confiável [1]

Recentemente uma empresa concessionária de energia elétrica, apresentou problemas em seus alimentadores. O problema em questão caracterizou-se pela retirada de serviço do transformador de um alimentador, ocasionando a interrupção de energia elétrica dos consumidores a ele conectados. O transformador foi retirado de serviço pela atuação do relé de proteção 51N (este ajustado para 60A), o que levou a equipe de técnicos da concessionária a realizar medições no referido transformador para averiguação do problema. Após as medições realizadas detectou-se a presença de componentes harmônicas nas correntes do transformador. Assim, no neutro verificou-se uma corrente de 3ª harmônica com valores bem próximos à corrente RMS de ajuste do relé em determinados horários do dia, e que esta corrente

ultrapassava um valor de 60A. A título de ilustração, a figura (1a) mostra o resultado da medição da corrente no neutro do transformador, enquanto que a figura (1b) o espectro harmônico correspondente. À priori, seria desejável que o neutro conduzisse, tão somente, a corrente fundamental, decorrente do desequilíbrio das cargas acopladas ao alimentador. Porém, observa-se na figura (1b), que a corrente que circula no neutro é constituída pela componente fundamental e pela componente de 3ª ordem, sendo esta cerca de 5,5 vezes maior, em comparação com a fundamental.

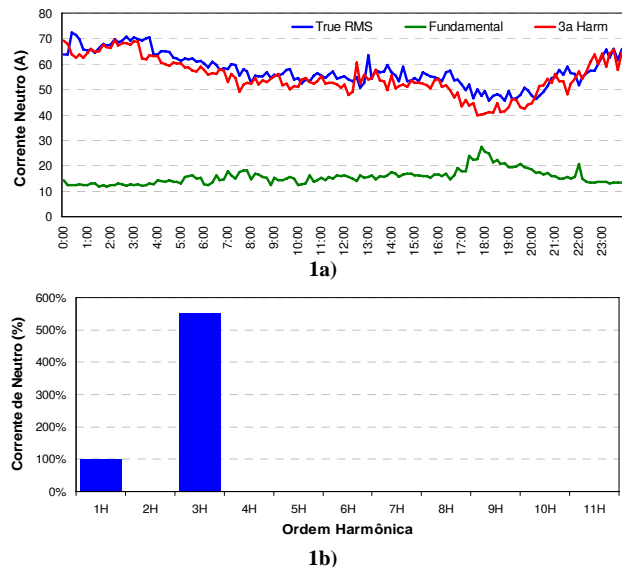


Figura 1 – (1a) Perfil de corrente no neutro em um dia típico, obtido pela medição (01/10/2005); (1b) Espectro harmônico da corrente no neutro do transformador da subestação, obtido pela medição (01/10/2005)

Adicionalmente, a figura (2a) mostra a medição da corrente de linha na saída do alimentador, realizada no dia 01/10/2005, e a figura (2b) mostra o conteúdo harmônico dessa corrente. Como é possível observar na referida figura, a corrente encontra-se com um conteúdo harmônico muito elevado, devido às cargas não lineares alimentadas pelo sistema.

Pode-se observar também que em determinados horários do dia, a corrente no neutro é maior que a corrente que circula pelas fases, como mostrado na figura (2a).

Ribeiro, N. S. S. é engenheiro eletricitista das Centrais Elétricas do Norte do Brasil, ELETRONORTE e mestrando em Qualidade da Energia pela Universidade Federal de Uberlândia. (niloribeiro@eln.gov.br)

SAMESIMA, M. I. é docente da Universidade Federal de Uberlândia (samesima@ufu.br)

RESENDE, Jose Wilson é docente da Universidade Federal de Uberlândia (jwresende@ufu.br)

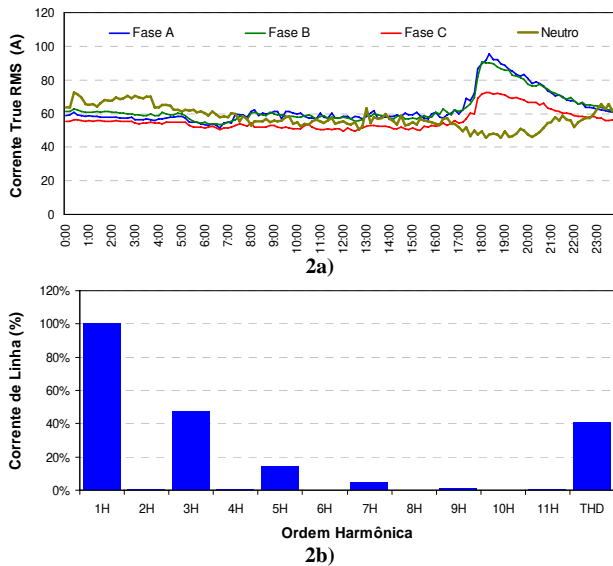


Figura 2 – (2a) Perfil da corrente de linha, obtido pela medição (01/10/2005); (2b) Espectro harmônico da corrente de linha, obtido pela medição (01/10/2005)

Assim, de acordo com as considerações acima, e em consonância com os propósitos de operação adequada do sistema, foi modelado neste artigo o referido alimentador no *ATP*, composto por 191 barras, nos níveis de 13,8kV e 7,967kV, para tensões nominais fase-fase e fase terra, respectivamente.

## II. MODELAGEM DO SISTEMA

A concessionária de energia forneceu os dados necessários para a modelagem no *ATP* de um alimentador considerado crítico, sob o ponto de vista do problema acima mencionado. Informações como resistência e reatância de linha, potências dos barramentos, correntes e níveis de tensão foram então inseridos na modelagem. Deve-se salientar que, em se tratando das medições foram fornecidas somente medições na saída do alimentador.

Para a representação das linhas e cargas foi utilizado o modelo RLC, contidas na biblioteca do programa utilizado (*ATP*). As cargas com comportamentos não lineares foram modeladas através da fonte *HFS\_Sour (Harmonic Frequency Scan Source)*, possibilitando a entrada de módulos e ângulos de tensão ou corrente, até a 11ª harmônica. Tais cargas não lineares foram dispostas em posições aleatórias no sistema do modelo digital, de forma que se pudesse verificar, na saída do alimentador, níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente próximos aos observados nas medições. Assim, com os parâmetros inseridos no programa, a figura (3a) mostra o espectro harmônico das correntes de linha obtidos na medição, e a figura (3b) o espectro harmônico das correntes de linha do sistema obtidos através da modelagem.

Por outro lado, a figura (4a) mostra o espectro harmônico da tensão de fase obtida na medição, e a figura (4b) mostra o espectro harmônico da tensão de fase obtido pela simulação. Complementarmente, a figura (5a) mostra o espectro harmônico da corrente no neutro do transformador obtida pela medição, e a figura (5b) mostra a corrente no neutro obtida pela simulação.

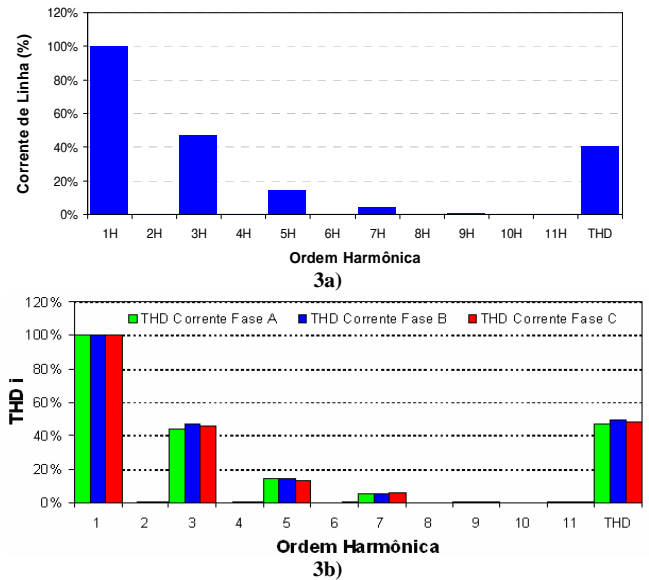


Figura 3 – (3a) Espectro harmônico da corrente de linha, obtido pela medição (01/10/2005); (3b) Espectro harmônico da corrente de linha, obtido pela simulação.

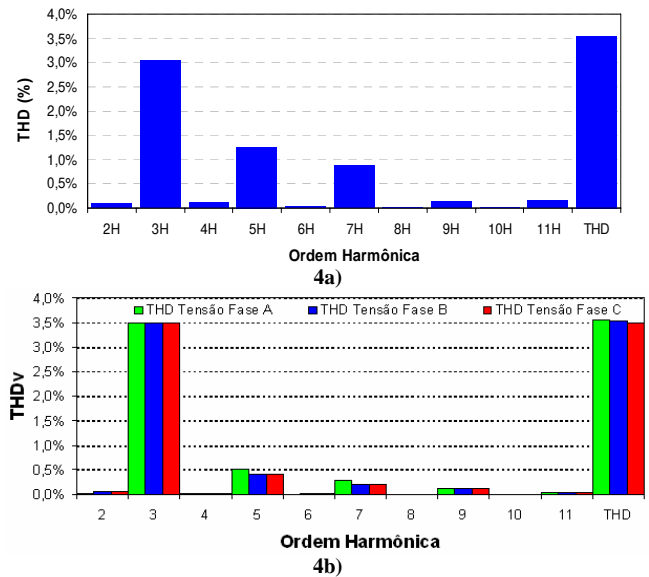
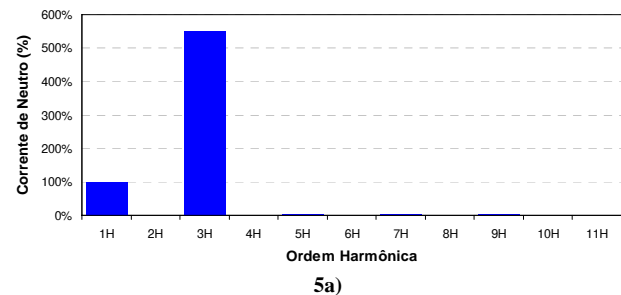


Figura 4 – (4a) Espectro harmônico da tensão de fase, obtido pela medição (01/10/2005); (4b) Espectro harmônico da tensão de fase, obtido pela simulação.



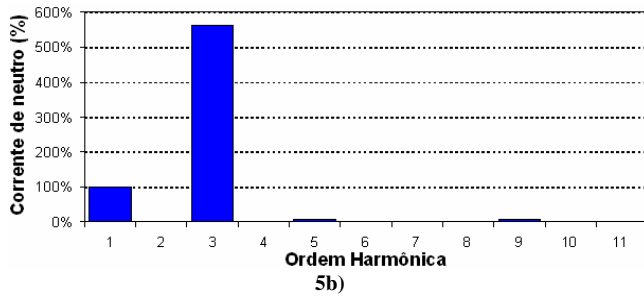


Figura 5 – (5a) Espectro harmônico da corrente no neutro, obtido pela medição (01/10/2005); (5b) Espectro harmônico da corrente no neutro, obtido pela simulação.

Verifica-se, portanto, de forma comparativa entre os valores medidos e aqueles obtidos da simulação apresentados nas figuras acima consideradas que, há uma forte correlação entre os resultados, revelando a concordância e a validação do modelo digital para os propósitos desta investigação.

### III. AVALIAÇÃO DO FILTRO DE SEQUÊNCIA ZERO

Objetivando avaliar o desempenho do filtro proposto neste trabalho, segue abaixo a sistemática adotada para a estrutura do filtro. Neste sentido, serão descritas a seguir cada estrutura utilizada na modelagem à partir e em consonância com as medições realizadas e, os resultados obtidos na simulação.

A estrutura a que se propõe avaliar neste trabalho é um filtro LC centrado no princípio da ressonância paralela, atuando de forma a bloquear o sinal sintonizado.

#### A. Filtro LC paralelo

A estrutura do filtro em questão é composta por uma associação paralela de elementos RLC, de forma a oferecer uma obstrução à passagem da corrente a qual este foi sintonizado. A figura (6) mostra a ligação equivalente do filtro com o sistema. O filtro foi sintonizado na 3ª ordem.

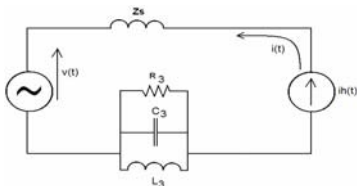


Figura 6– Diagrama resultante por fase do sistema com o filtro de correntes de terceira ordem.

A equação (1) mostra a impedância equivalente do filtro. Para simplificar os cálculos a resistência do arranjo não foi considerada.

$$Z_{eq} = (jX_L) // (-jX_C) \quad (1)$$

Desenvolvendo a equação (1) tem-se:

$$Y_{eq} = \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{-jX_C} \quad (2)$$

$$Z_{eq} = -j \frac{X_L \times X_C}{X_L - X_C} \quad (3)$$

Pela inspeção da equação (3), é possível verificar que na frequência de ressonância a impedância equivalente tende ao infinito. Nas frequências acima e abaixo da frequência de ressonância a impedância equivalente do filtro assume características indutivas e capacitivas, respectivamente.

#### B. Parametrização do filtro

O critério inicial para o cálculo da indutância do filtro foi a limitação da queda de tensão, à frequência fundamental na reatância indutiva do filtro. A equação (5) mostra o critério adotado.

$$\Delta V_{ZF} \leq 0,01 \times V_f \quad (5)$$

Onde:

$\Delta V_{ZF}$  : Queda de tensão (RMS) na impedância do filtro à frequência fundamental;

$V_f$  : Tensão (RMS) à frequência fundamental.

Assim, a equação (6) determina o valor da indutância do filtro.

$$L = \frac{0,01 \times V_f}{\omega_f \times I_f} \quad (6)$$

Onde:

$I_f$ : Corrente fundamental;

$\omega_f$  : frequência angular fundamental.

De posse do valor da indutância dada pela equação (6), a capacitância pode ser determinada pela equação (7) abaixo.

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 \times L} \quad (7)$$

Onde:

$\omega_0$  : frequência angular de ressonância.

A tabela I mostra o resumo dos parâmetros do filtro de 3ª ordem modelado.

TABELA I  
RESUMO DOS PARÂMETROS DO FILTRO DE 3ª ORDEM MODELADO

Indutância (L)	1,705 mH
Capacitância (C)	490,54 $\mu$ F
Resistência	111,87 $\Omega$
Largura de banda ( $\omega_B = 1/RC$ ) (Hz)	18

### IV. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Como resultados obtidos na simulação, a figura (7) mostra a comparação entre as correntes de linha, na saída do transformador, antes e após a conexão do filtro no sistema, e a figura (8) o espectro harmônico das referidas correntes antes e após a conexão do filtro em série com o neutro do sistema.

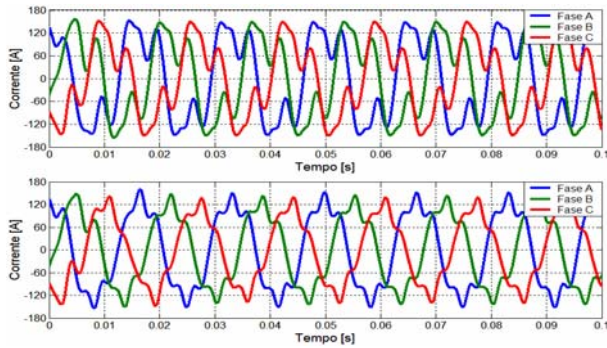


Figura 7 – Correntes de linha antes e após a conexão do filtro.

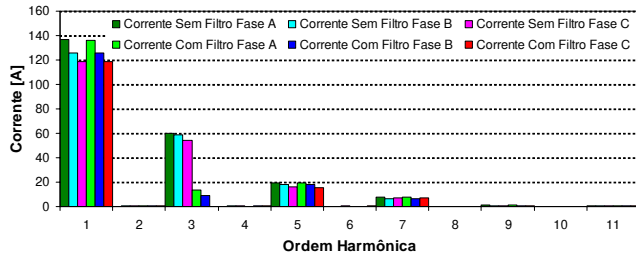


Figura 8 – Espectro harmônico das correntes de linha antes e após o acoplamento do filtro.

Observa-se nas figuras (7) e (8) acima que o filtro proporcionou uma significativa redução no fluxo de correntes de 3ª ordem nas fases do sistema. As figuras (9) e (10) apresentam, respectivamente, as formas de onda das tensões de fase e os espectros harmônicos correspondentes, na saída do transformador.

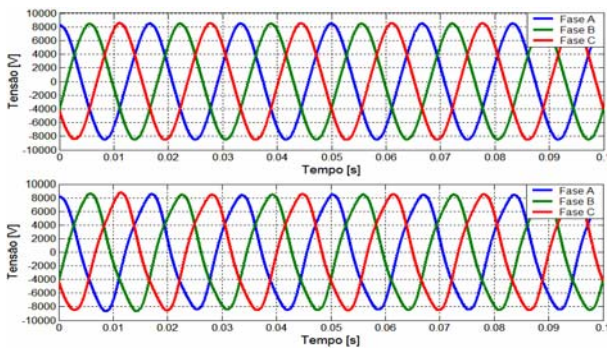


Figura 9 – Tensões de fase antes e após a conexão do filtro de 3ª ordem

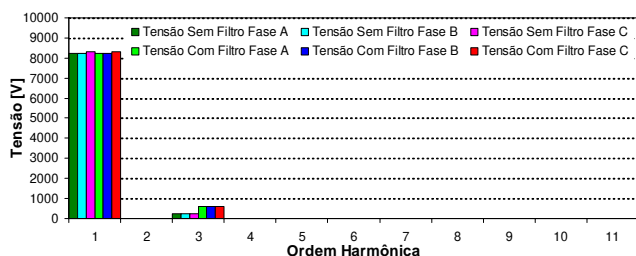


Figura 10 – Espectro harmônico das tensões de fase antes e após o acoplamento do filtro.

A figura (10) evidencia a maior desvantagem da utilização do filtro em estudo, a queda de tensão harmônica na impedância harmônica do filtro. Entretanto, como mostra a simulação, esta queda de tensão não é muito significativa. A

figura (11) mostra a corrente *RMS* no neutro do transformador, antes e após o acoplamento do filtro, e a figura (12) mostra o espectro harmônico da corrente em questão.

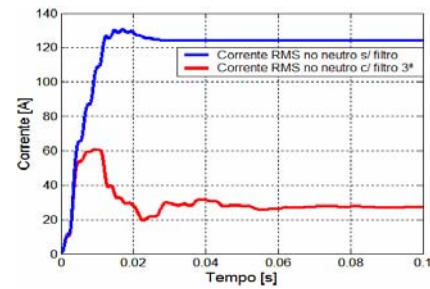


Figura 11 – Corrente *RMS* no neutro do transformador sem e com o filtro.

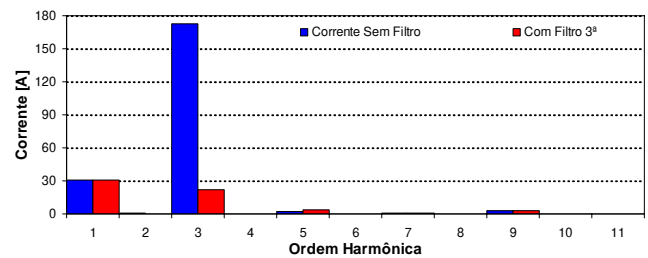


Figura 12 – Comparação entre os espectros harmônicos da corrente no neutro do transformador.

É possível verificar nas figuras (11) e (12) que o filtro avaliado tem um excelente desempenho, no que tange ao seu propósito. A redução da corrente de 3ª ordem atingiu um índice de, aproximadamente 87%.

A figura (13) mostra a interação entre a impedância do filtro e do sistema com a variação da frequência. Nesta figura é possível observar que existe a ocorrência de ressonâncias série e paralelas entre a impedância do sistema e a impedância do filtro, com a variação da frequência. Entretanto, não há correntes harmônicas significativas sendo geradas pelo sistema (carga não linear), o que não representa problemas quanto à esforços térmicos (correntes excessivas) e esforços dielétricos (sobre-tensões).

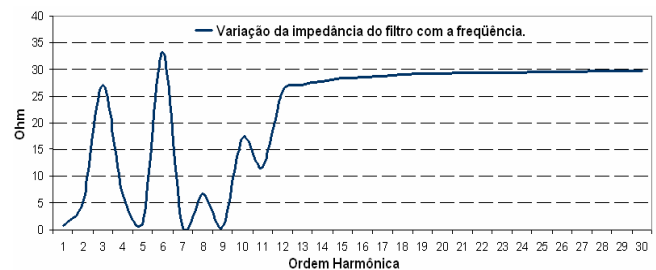


Figura 13 – Interação entre a impedância do filtro com a impedância do sistema, devido a variação da frequência.

A tabela II resume a variação do fator de potência em função do acoplamento do filtro. A tabela III mostra a variação da distorção harmônica de tensão e corrente, por fase, evidenciando a atuação do filtro no neutro.

TABELA II  
VARIACÃO DO FATOR DE POTÊNCIA POR FASE

Sem filtro		Com filtro	
$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$	$\cos(\phi_1)$	$\frac{\cos\phi}{\sqrt{1+DIT^2}}$
0,99934	0,9060	0,9999	0,9829
0,98739	0,8859	0,9874	0,9736
0,95802	0,8631	0,9579	0,9479

TABELA III  
VARIACÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO E CORRENTE

Sem filtro		Com filtro	
DTT%	DTI%	DTT%	DTI%
2,9053%	46,536%	7,23%	18,32%
2,9%	49,211%	7,24%	16,92%
2,8675%	48,157%	7,14%	14,52%

A tabela III mostra, de forma objetiva o desempenho do filtro no sistema. Pode-se verificar que a distorção harmônica de corrente foi reduzida, em média 28%. A topologia analisada apresentou um desempenho satisfatório, porém contribuiu para a deterioração das tensões de fase, devido à queda de tensão harmônica, sobretudo em função da alta impedância para a corrente de 3ª ordem.

#### V. CONCLUSÕES

A simplicidade e eficiência dos filtros ressonantes, aliada à relativa simplicidade em sua modelagem e confiabilidade em seu funcionamento, faz com que esses filtros sejam uma das soluções mais utilizadas na minimização de correntes harmônicas em diversos sistemas de potência. Neste sentido, pode-se mencionar como aplicação destes filtros utilizados na ESCELSA e também nos sistemas da Eletronorte na SE de Coxipó. Os resultados das simulações objetivaram mostrar a eficiência do método de filtragem harmônica. Foi possível observar que o sistema obteve uma significativa melhora com o acoplamento do filtro de 3ª ordem. Pela observação das figuras que trazem os resultados das simulações é possível verificar que a corrente a que o filtro se propõe a minimizar teve o seu conteúdo reduzido. Entretanto, os resultados que dizem respeito à distorção harmônica total de tensão, apresentaram-se elevados, o que pode botar em questão o desempenho do filtro analisado. Os resultados obtidos mediante a análise do fator de potência e do fator de deslocamento demonstram que o filtro em série conectado no neutro do sistema, sintonizado na 3ª ordem contribuiu para a melhoria da qualidade da energia do sistema como um todo.

Uma outra vantagem na utilização deste tipo de filtro é a possibilidade de utilizar em sua construção a reatância de aterramento do neutro do transformador, e existir, possibilitando uma economia na aquisição deste equipamento.

#### VI. AGRADECIMENTOS

Nosso reconhecimento e gratidão a CAPES pelo apoio financeiro, à ESCELSA pelos dados fornecidos e à ELETRONORTE pelo apoio técnico.

#### VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. W. Chang, M. J. Chiu, K. S. Lee, Y.F. Hsu, "Analysis of High Neutral Current in three-Phase Four-Wire Multi-Grounded Distribution Feeders", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES Publication Date: 7-12 Sept. 2003 Volume: 2, On page(s): 531- 535 vol.2
- [2] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B. Apolônio, R., Belchior, F. N., "Operação conjunta: Filtro e Bloqueador Eletromagnético para Correntes de Seqüência zero", VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade sobre Qualidade da Energia Elétrica, Belém-PA, Brasil.
- [3] Pekik, A. D., Syafrudin, "A practical Approach to Minimize the Zero-Sequence Current Harmonics in Power Distribution Systems", PCC-1997, Japan.
- [4] H. L. Jou, j. C. Wu, K. D. Wu, W. J. Chiang, "Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, nº 2, April 2005.
- [5] Roger C. Dugan, Marck F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [6] Shih-Min Hsu, "Reactive power compensator with harmonic blocking feature", System Theory, 1996., Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium on 31 March-2 April 1996 Page(s):206 – 210.
- [7] Oliveira, J. C., Vitor A. Bernardes, Luis C. O. Oliveira, João F. V. Ferreira, R., Belchior, F. N., "Variáveis de influência no desempenho de filtros eletromagnéticos de seqüência zero", SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2006, Campina Grande – Paraíba – Brasil.
- [8] S. L. Talleen. (1996, Apr.). The Intranet Architecture: Managing information in the new paradigm. Amdahl Corp., Sunnyvale, CA. [Online]. Available: <http://www.amdahl.com/doc/products/bsg/intra/intra/html>
- [9] Ribeiro, N. S. S., "Avaliação de Filtros Eletromagnéticos e Sintonizados LC Para Minimização de Correntes de Seqüência Zero em Sistemas de Distribuição a Quatro Fios", Dissertação de mestrado(em fase final), Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

#### VIII. BIOGRAFIAS

**Nilo Sérgio Soares Ribeiro**, nascido em Brasília, DF em 28 de Novembro de 1978. É engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Mato Grosso (2004), é mestrando em Qualidade da Energia pela Universidade Federal de Uberlândia e atualmente é engenheiro das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.

**Milton Itsuo Samesima**, nascido em Ipuã, SP em 18 de agosto de 1952. É engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Uberlândia (1977), mestre e doutor em engenharia elétrica pela Escola Politécnica da USP em 1984 e 1990, respectivamente. Atualmente é professor titular na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia(UFU). É componente de um grupo de pesquisas na área de qualidade da energia elétrica. Possui inúmeras publicações em congressos nacionais, internacionais e revistas.

**José Wilson Resende**, nascido em Carmo do Paranaíba, MG em 26 de março de 1952. É engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal de Uberlândia(1975), mestre em engenharia elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá(EFEI) em 1979 e PhD pela Aberdeen University-UK em 1986. É professor titular na UFU desde 1976. É membro de um grupo de pesquisas na área de qualidade da energia elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Possui inúmeros trabalhos publicados em congressos nacionais, internacionais e revistas.