



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7526
Tópico: Modelagem e Simulações

OPERAÇÃO CONJUNTA: FILTRO E BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO PARA HARMÔNICAS DE SEQÜÊNCIA ZERO

JOSÉ CARLOS DE
OLIVEIRA
UFU

ROBERTO APOLÔNIO
UFMT

ARNULFO BARROSO DE
VASCONCELLOS
UFMT

FERNANDO NUNES BELCHIOR
UFU

RESUMO

Este artigo apresenta o princípio de funcionamento, modelagem, implementação computacional e estudos de desempenho de uma nova concepção para a filtragem de componentes harmônicos de seqüência zero. Esta proposta contempla o emprego de duas unidades eletromagnéticas operando de forma conjunta. Uma delas constitui-se de um arranjo paralelo e outra em série. Um protótipo do conjunto para filtragem é também apresentado e as propriedades operativas são ilustradas de modo experimental e computacional.

PALAVRAS-CHAVE

Distorções harmônicas, correntes harmônicas de seqüência zero, filtro eletromagnético.

1.0 INTRODUÇÃO

Estudos em sistemas de distribuição de baixa tensão a quatro fios (três fases e neutro), suprimindo cargas com fortes características não-lineares, a exemplo de: lâmpadas com reatores eletrônicos, computadores, etc., apresentam-se, normalmente, com altos valores para as correntes no condutor neutro [1] e [2]. Esta situação ocorre mesmo sob condições equilibradas para as cargas. Maiores investigações destas correntes evidenciam que as mesmas são predominantemente caracterizadas por correntes harmônicas de seqüência zero (3^a, 9^a, 15^a, etc.). Como se sabe,

tais componentes constituem-se, vias de regra, em componentes de seqüência zero e suas naturezas impõem uma composição aritmética junto ao cabo neutro. Muitas vezes, os denominados carregamentos de neutro resultam em correntes até superiores às correspondentes correntes de fase. Associado a este fato pode-se encontrar situações operacionais bastante críticas na forma de sobreaquecimentos do condutor neutro, do transformador de distribuição, elevação do potencial do neutro e o aparecimento de ruídos de modo comum.

Diferentes técnicas têm sido utilizadas para a eliminação ou redução das correntes harmônicas de seqüência zero nos sistemas elétricos de distribuição. Em [3] tem-se a utilização de um filtro ativo para cancelar as correntes harmônicas de seqüência zero. Uma outra estratégia consiste no uso de um filtro eletromagnético de baixa impedância de seqüência zero, ligado em paralelo com a carga não linear [4], [5]. Estas referências mostraram que a eficiência do filtro paralelo depende da impedância de seqüência zero do filtro, a qual, por sua vez, está relacionada com a reatância de dispersão entre os enrolamentos pertencentes à mesma coluna do núcleo e da impedância de seqüência zero do sistema de suprimento no local de instalação do dispositivo. A corrente que se estabelece através do filtro é dada por:

$$I_{NF} = \frac{Z_{SZ_S}}{Z_{SZ_S} + Z_{SZ_F}} I_{SZ_NC} \quad (1)$$

sendo:

I_{SZ_NC} - Corrente de seqüência zero gerada pela

carga não linear;

I_{NF} - Corrente de seqüência zero através do neutro do filtro paralelo;

Z_{SZ_S} - Impedância de seqüência zero do sistema de suprimento;

Z_{SZ_F} - Impedância de seqüência zero do filtro paralelo;

A corrente de seqüência zero gerada pela carga não linear será drenada totalmente pelo filtro se a impedância de seqüência zero do filtro for bem menor que a impedância de seqüência zero do sistema de suprimento.

Por outro lado, a corrente resultante no neutro da fonte, depois da inserção do filtro paralelo, pode ser calculada por:

$$I_{NSS} = \frac{Z_{SZ_F}}{Z_{SZ_F} + Z_{SZ_S}} I_{SZ_NC} \quad (2)$$

sendo:

I_{NSS} Corrente de seqüência zero através do neutro do sistema de suprimento.

A equação (2) mostra que a corrente no neutro do sistema de suprimento será tão menor quanto maior for a impedância de seqüência zero do sistema quando comparada com a impedância de seqüência zero do filtro.

Esta situação nem sempre pode ser encontrada na prática, pois dependerá fortemente do local onde o filtro é instalado no sistema elétrico. Objetivando avançar nesta direção, este artigo propõe uma combinação do filtro de seqüência zero paralelo com um dispositivo bloqueador de seqüência zero em série. Assim procedendo, como será mostrado, obtém-se uma substancial melhoria do desempenho da proposta eletromagnética para filtragem.

2.0 - FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

A equação (1) permite constatar que a eficiência do filtro paralelo de seqüência zero depende fortemente da relação entre a impedância de seqüência zero do filtro e da impedância de seqüência zero do sistema.

Em instalações comerciais ou industriais de baixa tensão é comum encontrar-se a unidade abaixadora de tensão formada por um ou mais transformadores trifásicos ligados em delta no lado de média tensão (13,8 e 34,5 kV) e em estrela aterrada no lado da baixa tensão. Estes equipamentos, normalmente apresentam uma impedância de seqüência zero dada por:

$$Z_{SZ_T} = 0,85.Z_{SP_T} \quad (3)$$

sendo:

Z_{SZ_T} Impedância de seqüência zero do transformador ligado em delta-estrela aterrada;

Z_{SP_T} Impedância de seqüência positiva do transformador ligado em delta-estrela aterrada.

A figura 1 mostra um sistema de distribuição trifásico a quatro fios com o filtro de seqüência zero ligado em paralelo com a carga não linear.

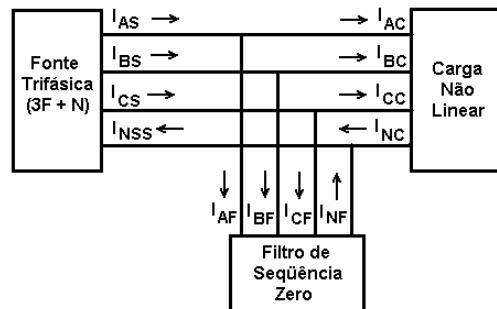


Figura 1 – Sistema de distribuição trifásico a quatro fios com um filtro de seqüência zero paralelo.

Na figura 1 tem-se:

I_{AS}, I_{BS}, I_{CS} e I_{NSS} e Corrente na linha A, B, C e neutro do sistema de suprimento;

I_{AC}, I_{BC}, I_{CC} e I_{NC} e Corrente na linha A, B, C e neutro da carga não linear;

I_{AF}, I_{BF}, I_{CF} e I_{NF} e Corrente na linha A, B, C e neutro do filtro de seqüência zero.

A figura 2 mostra o circuito equivalente monofásico da figura 1, levando-se em consideração à impedância equivalente de seqüência zero do sistema de suprimento.

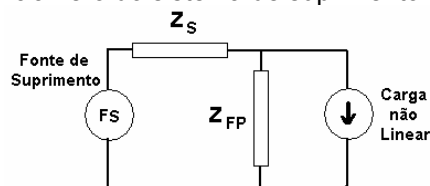


Figura 2 – Circuito monofásico equivalente.

A tabela 1 fornece valores típicos para a impedância de seqüência positiva para diferentes potências de transformadores trifásicos abaixadores, referidas ao lado de baixa tensão e com tensão primária máxima de 15 kV, usados nas subestações de consumidores comerciais ou industriais. Considerando a existência somente do transformador abaixador, ou mesmo, que o filtro esteja localizado próximo ao transformador, a impedância de seqüência zero equivalente do sistema de suprimento será definida por $0,85.Z_{TR}$. Tendo em mente que o filtro paralelo deverá

competir com tal impedância, este dispositivo deverá ser dimensionado para apresentar uma impedância de seqüência zero bem menor que a correspondente impedância do transformador. Como a obtenção de tal propriedade não se constitui em tarefa fácil, surge a idéia da inserção de uma outra unidade em série, a qual foi denominada neste trabalho por bloqueador de seqüência zero, o qual é tratado a seguir.

Tabela 1 – Impedância, resistência e reatância máxima para transformadores de 13,8 kV/220-127V.

Potência do transformador (kVA)	Impedância Z_{TR} (Ω)	Resistência (Ω)	Reatância de dispersão (Ω)
15	0,11294	0,07314	0,07313
30	0,09780	0,03065	0,09287
45	0,06520	0,01864	0,06247
75	0,03912	0,00981	0,03787
112,5	0,02608	0,00593	0,02539
150	0,01956	0,00411	0,01912
225	0,01676	0,00258	0,01656
300	0,01257	0,00180	0,01244
500	0,00922	0,00193	0,00901

3.0 – BLOQUEADOR TRIFÁSICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

O bloqueador de seqüência zero se caracteriza por um dispositivo ligado em série com o sistema de suprimento conforme indicado na figura 3. A idéia está na inserção de dispositivo que ofereça uma impedância relativamente alta à seqüência zero e comparativamente baixa para a impedância de seqüência positiva ou negativa.

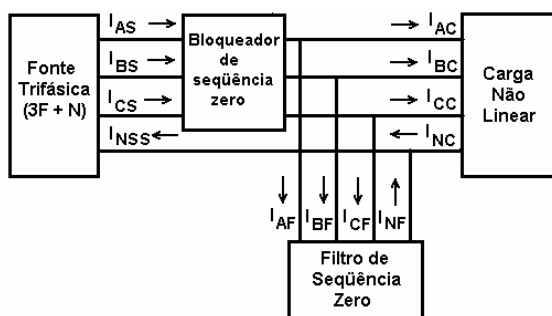


Figura 3 – Filtro de seqüência zero (paralelo) e bloqueador de seqüência zero (série).

A figura 4 mostra o aspecto físico construtivo do bloqueador, o qual deverá ser dimensionado para conduzir a corrente nominal da carga não linear e operar na região linear da curva BH do núcleo magnético.

4.0 – MODELAGEM DO BLOQUEADOR E FILTRO NO SIMULADOR SABER

Os modelos computacionais dos arranjos magnéticos para o filtro paralelo foram devidamente explorados nas referências [4] e [5]. Fundamentando na mesma estratégia, a figura 5 mostra o modelo físico dos enrolamentos e do núcleo equivalente da figura 4, onde se observa a distribuição dos principais fluxos magnéticos.

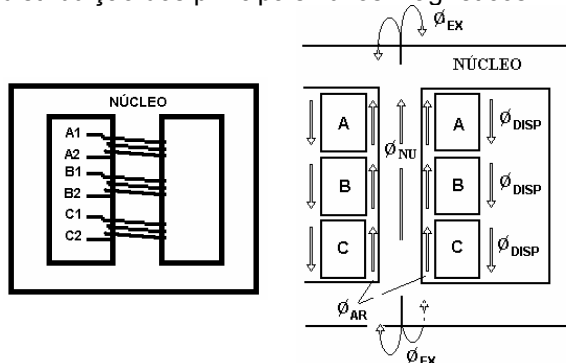


Figura 4 – Aspecto físico do bloqueador. Figura 5 – Distribuição dos fluxos magnéticos.

Na figura 5:

- ϕ_{NU} Fluxo magnético no núcleo;
- ϕ_{AR} Fluxo no caminho de ar entre o núcleo e os enrolamentos;
- ϕ_{DISP} Fluxo de dispersão de cada um dos enrolamentos;
- ϕ_{EX} Fluxo através do caminho de ar entre a culatra superior e inferior.

Ao se admitir uma construção física alternativa para os enrolamentos, conforme indicado na figura 6, o fluxo de dispersão de cada bobina pode ser bastante minimizado, ou mesmo desprezado. Nestas circunstâncias chega-se a uma estrutura magnética equivalente simplificada, formada pela combinação das relutâncias do núcleo e FMMs. Esta situação é indicada na figura 7, onde:

- $F_{(A)}$, Forças magnetomotrizes dos enrolamentos das fases A, B e C, respectivamente;
- R_{NU1} Relutância da coluna central do núcleo;
- R_{NU2} Relutância equivalente das colunas laterais e culatras.

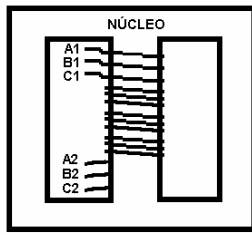


Figura 6 – Bloqueador de seqüência zero com núcleo magnético equivalente do núcleo e enrolamentos da figura 6.

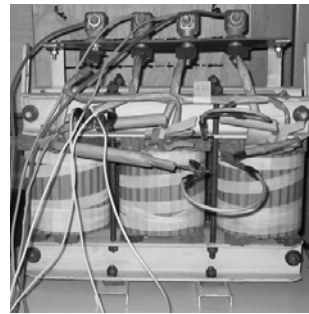
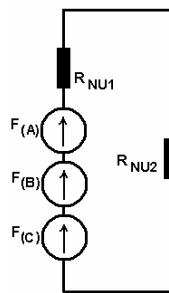


Figura 8 – Foto do protótipo de filtro paralelo.

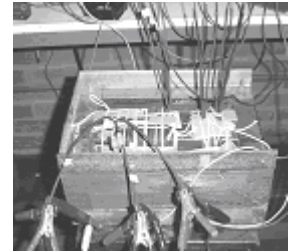


Figura 9 – Foto do protótipo do bloqueador de seqüência zero.

5.0 – CARACTERÍSTICAS DOS PROTÓTIPOS

A tabela 2 fornece as características elétricas e geométricas do protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero a ser ligado em paralelo com a carga não linear. A figura 8 mostra o equipamento propriamente dito.

Tabela 2. Características elétricas e físicas do protótipo do filtro paralelo.

Tensão fase-fase	220 V
Potência trifásica	9000 VA
Número de espiras da BP e BA	88 espiras
Área bruta do núcleo	41,19 cm ²
Fator de empilhamento	0,95
Altura da janela	13,6 cm
Altura do núcleo	27,6 cm
Resistência das bobinas (BP + BA)	0,145 Ω
Reatância dispersão (BP e BA)	0,0895 Ω
Impedância de dispersão entre BP e BA	0,1704 Ω

Por outro lado, as principais as características elétricas e geométricas do protótipo do bloqueador de seqüência zero, cujos parâmetros foram utilizados nas simulações computacionais, encontra-se na tabela 3. A figura 9 ilustra o equipamento em questão.

Tabela 3. Características elétricas e físicas do protótipo do bloqueador série.

Número de espiras por enrolamento	8 espiras
Área bruta do núcleo	64,0 cm ²
Fator de empilhamento	0,96
Altura da janela	13,6 cm
Altura do núcleo	27,6 cm
Resistência dos enrolamentos	0,01 Ω

6.0 – AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de investigar a operação conjunta do filtro eletromagnético de seqüência zero e do bloqueador de seqüência zero, utilizou-se a configuração mostrada na figura 10. Como carga não linear empregou-se um reator trifásico a núcleo saturado (RNS) com o ponto comum dos enrolamentos ligados ao neutro do sistema.

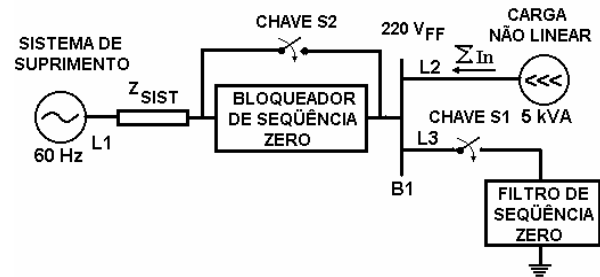


Figura 10 – Diagrama esquemático da configuração nas simulações computacionais e nos testes em laboratório.

Os trabalhos de simulação compreenderam duas situações. Uma primeira com o filtro paralelo ligado à carga (chave S1 fechada), sem a presença do bloqueador de seqüência zero (chave S2 fechada). Posteriormente, a chave S2 foi aberta ($t=0,3s$), colocando-se o bloqueador em série com o alimentador L1.

6.1 – Correntes de Linha

A figura 11 mostra as correntes resultantes na linha A do alimentador L1 e do filtro (L3) decorrentes das situações mencionadas acima. As tensões de suprimento foram consideradas equilibradas, bem como também a carga não linear.

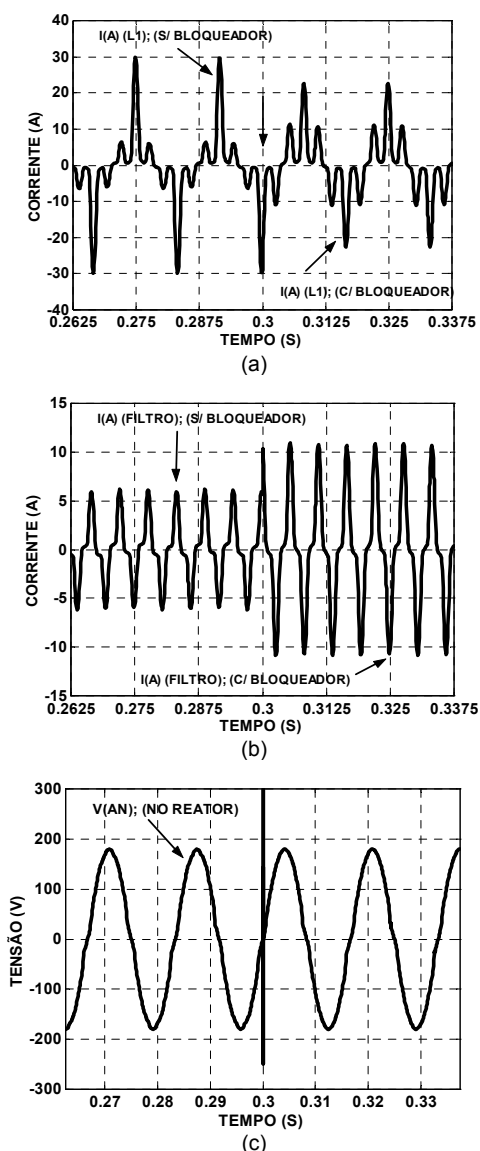


Figura 11 – (a) Corrente no alimentador L1 (linha A); (b) corrente no filtro (L3) (linha A); (c) Tensão fase-neutro nos terminais do reator (V_{AN}); ($t_{\text{INSERÇÃO DO BLOQUEADOR}}=0,3$ s)

A tabela 4 fornece os valores da decomposição harmônica da corrente do alimentador L1 (linha A), antes e após a inserção do bloqueador série. Observa-se uma significativa diminuição da 3^a e 9^a harmônicas com a inserção do bloqueador, além daquela já anteriormente provocada pela inserção do filtro paralelo.

Tabela 4 – Decomposição harmônica da corrente na linha A do alimentador L1

t (s)	Fund	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a
<0,3	9,61	4,12	6,85	5,19	1,70	0,14
>0,3	9,05	0,20	6,38	4,82	0,07	0,00

A corrente fundamental suprida para a carga não linear (RNS) permanece praticamente inalterada.

6.2 Correntes no neutro

A figura 12 mostra as formas de onda da corrente no neutro do sistema de suprimento e a corrente no neutro do filtro paralelo. As mesmas foram obtidas sem e com a inserção do bloqueador série, que ocorreu em $t=0,3$ s.

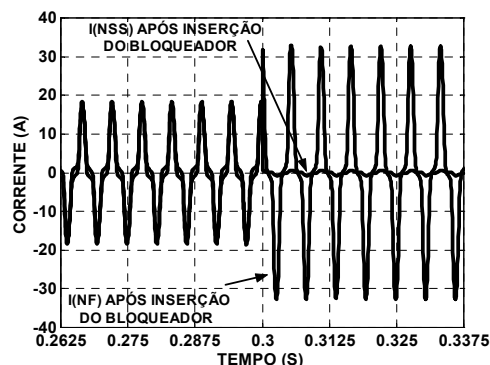


Figura 12 – Corrente no neutro do sistema de suprimento – $I(NSS)$ e corrente no neutro do filtro paralelo – $I(NF)$, após a inserção do bloqueador em $t=0,3$ s.

O efeito da inserção do bloqueador, como se percebe, é o de desviar as correntes de seqüência zero para o filtro paralelo. Isto é decorrente do fato que tais componentes de corrente passam a enfrentar uma maior impedância na direção da alimentação geral.

7.0 AVALIAÇÃO LABORATORIAL

Empregando desta vez um arranjo laboratorial no qual se faz presente um protótipo de reator saturado como fonte de harmônicos, procedeu-se a uma série de experimentos objetivando a validação experimental das constatações anteriores quanto à eficácia do desempenho físico da proposta deste artigo.

7.1 Correntes de linha

A figura 13 mostra as formas de onda das correntes em L1 sem o filtro paralelo e sem o bloqueador série. A tabela 5 quantifica os resultados.

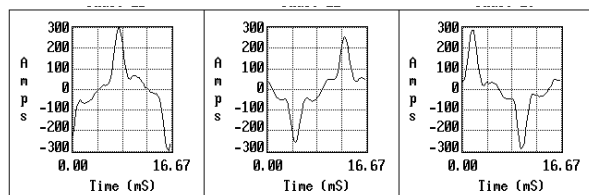


Figura 13 – Correntes no alimentador L1 sem o filtro paralelo e sem bloqueador série. Fator de multiplicação de escala (FME)=0,1.

Tabela 5 – Correntes em L1 sem o filtro paralelo, com a carga não linear (RNS) e sem o bloqueador série.; (valores eficazes)

	Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I(A)	10,917	5,017	3,967	1,583	0,367	0,150	12,760
I(B)	10,100	3,540	3,563	1,278	0,352	0,058	11,359
I(C)	10,800	5,017	4,217	1,700	0,433	0,200	12,760

A tabela 6, por sua vez, as harmônica das correntes de linha após a inserção do filtro paralelo. Os resultados evidenciam uma expressiva diminuição na 3^a, 9^a e 15^a harmônicas da corrente.

Tabela 6 – Correntes em L1 com o filtro paralelo, com a carga não linear (RNS) e sem o bloqueador série.; (valores eficazes)

	Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I(A)	11,637	0,827	4,230	1,785	0,100	0,075	12,541
I(B)	10,428	0,788	4,038	1,522	0,077	0,000	11,317
I(C)	11,667	0,900	4,680	1,917	0,110	0,107	12,753

Com a inserção do filtro bloqueador, o desempenho do filtro fica melhorado, como mostra os resultados da tabela 7. Nesta tabela a 9^a e 15^a harmônicas são praticamente eliminadas, restando somente um nível muito pequeno da 3^a harmônica de corrente.

Tabela 7 – Correntes em L1 com o filtro paralelo, com a carga não linear (RNS) e com o bloqueador série.; (valores eficazes)

	Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I(A)	11,637	0,160	4,332	1,800	0,042	0,000	12,548
I(B)	10,862	0,221	4,212	1,567	0,000	0,000	11,757
I(C)	11,684	0,151	4,570	1,885	0,097	0,077	12,689

A figura 14 mostra as formas de onda das correntes de linha com o filtro e o bloqueador operando conjuntamente.

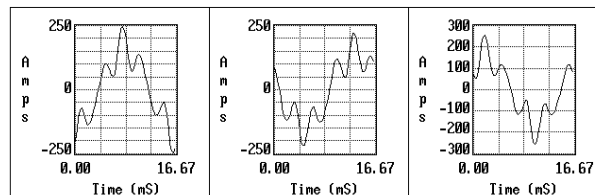


Figura 14 – Formas de onda das correntes de linha com o filtro paralelo e o bloqueador série.

7.2 Corrente de Neutro

A tabela 8 fornece a decomposição harmônica para a corrente no neutro do sistema (I_{NSS}) e no neutro da carga não linear (I_{NC}) sem a presença do filtro paralelo e sem o bloqueador série.

Tabela 8 – Correntes de neutro sem o filtro paralelo e sem o bloqueador série.

	Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I_{NSS}	0,808	14,404	0,368	0,126	1,202	0,374	14,487
I_{NC}	0,814	14,402	0,37	0,124	1,198	0,372	14,485

Uma vez conectado o filtro paralelo, a tabela 9 apresenta os resultados das medições das correntes I_{NSS} , I_{NC} e I_{NF} , com a inserção do filtro paralelo somente.

Tabela 9 – Correntes de neutro com o filtro paralelo e sem o bloqueador série.

	Fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I_{NSS}	0,857	2,358	0,518	0,156	0,278	0,138	2,586
I_{NC}	1,473	14,610	0,432	0,008	1,503	0,512	14,784
I_{NF}	2,315	11,901	0,132	0,130	1,317	0,387	12,202

Finalmente, os resultados constantes da Tabela 10 apresentam as mesmas correntes considerando o operação conjunta do filtro e do bloqueador.

Tabela 10 – Correntes de neutro com o filtro paralelo e com o bloqueador série.

	fund.	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	15 ^a	I _{RMS} (A)
I_{NSS}	0,069	0,136	0,0	0,0	0,0	0,0	0,152
I_{NC}	1,553	14,633	0,390	0,0	1,480	0,520	14,804
I_{NF}	1,610	14,367	0,363	0,0	1,463	0,506	14,545

Os trabalhos experimentais também mostraram que, com a inserção do bloqueador, não há alterações na distorção harmônica da tensão nos terminais da carga não linear.

8.0 - CONCLUSÕES

O enfoque principal deste artigo foi analisar computacionalmente e experimentalmente o comportamento da operação conjunta de um filtro

de seqüência zero paralelo e de um bloqueador de seqüência zero série. Os resultados das simulações computacionais e das medições em laboratório mostraram que o uso de uma unidade bloqueadora série melhora consideravelmente o desempenho do sistema de filtragem. Como destacado no artigo, o emprego deste dispositivo complementar torna-se de grande relevância quando das dificuldades advindas da correlação entre a impedância de seqüência zero do filtro paralelo e a correspondente grandeza do lado do suprimento. Além deste aspecto, a inserção do filtro série auxilia no controle de um efeito indesejável através do qual os dispositivos paralelo passam a absorver componentes de seqüência zero outras que não aquelas do alimentador focado.

9.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Liew, AH-Choy, "Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting Circuits", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, N^o 4, July/August 1989.
- [2] Gruz, T. M., "A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, N^o 4, July/August 1990, pp.719-725.
- [3] Enjeti, P. N., Shireen, W., Packebush, P. and Pitel, I. J., "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, N^o 6, November/December 1994, pp.1565-1572.
- [4] Apolônio, R., Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Oliveira, A. e Souto, O. C. N., "Filtro Eletromagnético para Harmônicos de Seqüência Zero", V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Aracajú-SE-Brasil.
- [5] Apolônio, R., Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B. e Oliveira, A., "Three-Phase Electromagnetic Filter for Zero Sequence Harmonics", VI Induscon 2004, Joinville-SC-Brasil.

