

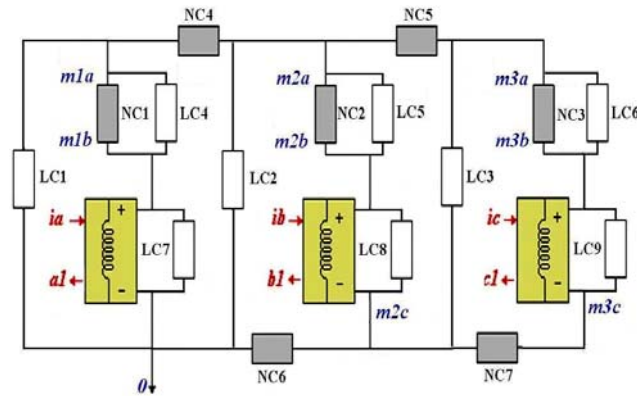


Figura 3.10 - Diagramas de blocos do filtro harmônico de sequência positiva e negativa implementado computacionalmente

Na figura 3.10:

- NC1 até NC7 - Núcleos magnéticos não-lineares, utilizando o *template corenl.sin*;
- $m1a$, $m1b$, $m2a$, $m2b$, $m2c$, $m3a$, $m3b$ e $m3c$ - São pontos de conexão das partes do núcleo que representam o espaço do núcleo com enrolamento e sem enrolamento;
- ia e $a1$, ib e $b1$, ic e $c1$ - São pinos elétricos que representam a alimentação das bobinas do filtro harmônico em questão, sendo ia , ib e ic utilizando o *template fonte.sin* e os demais são interligações entre bobinas;
- LC1 até LC9 - Núcleos magnéticos lineares que representam os fluxos de dispersão através do ar.

Da mesma forma que para o filtro de sequência zero, a representação da não-linearidade é realizada através do *template corenl*.

A partir do exposto, é possível a elaboração do *template* destinado à modelagem de um filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa. O resultado desta etapa é mostrado a seguir.

```
#####      FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUENCIA POSITIVA E NEGATIVA      #####

# enrolamentos-----

# fase A
wind.I1 ia a1 m1b 0 =n=116, r=0.14112
core.LC7 m1b 0=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase B
wind.I2 ib b1 m2b m2c =n=116, r=0.14112
core.LC8 m2b m2c=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# fase C
wind.I3 ic c1 m3b m3c =n=116, r=0.14112
core.LC9 m3b m3c=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1, geo_units=meter

# núcleos -----

# núcleo 1
corenl.NC1 m1a m1b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC4 m1a m1b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC1 m1a 0=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 2
corenl.NC2 m2a m2b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC5 m2a m2b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC2 m2a 0=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# núcleo 3
corenl.NC3 m3a m3b = len=0.195, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss
core.LC6 m3a m3b=area=1.9e-4, len=0.121, ur=1,geo_units=meter
core.LC3 m3a m2c=area=1.9e-4, len=0.241, ur=1,geo_units=meter

# culatras superiores
corenl.NC4 m1a m2a = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC5 m2a m3a = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# culatras inferiores
corenl.NC6 0 m2c = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

corenl.NC7 m2c m3c = len=0.08, area=19.488e-04, model=
[(ui=2500,uhc=60000,bmax=18000,hmax=21.36,bsat=17000,hsat=12.56,br=850,
hc=1,ptemp=20,tau=0)], tempc=20,units=gauss

# Fim do template
```

A figura 3.11 indica a estrutura física para o filtro de seqüência positiva e negativa empregado nos estudos. Objetivando uma avaliação preliminar do desempenho da modelagem estabelecida, tal como realizado anteriormente com o filtro de seqüência zero, realiza-se, a seguir, um estudo voltado para a identificação da eficácia do dispositivo.

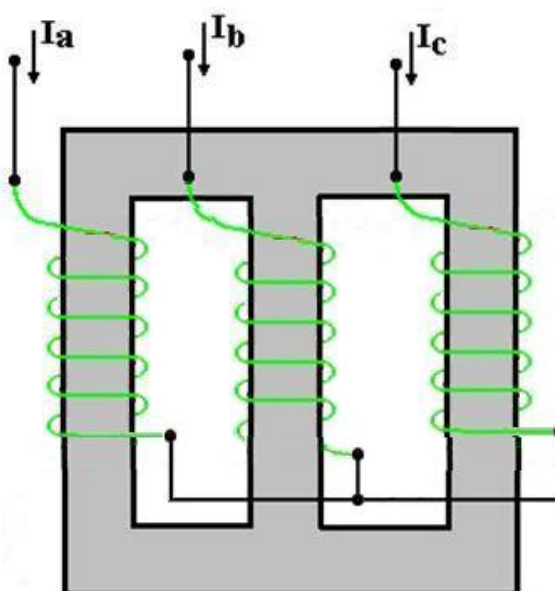


Figura 3.11 - Modelo físico do filtro harmônico de seqüência positiva e negativa implementado computacionalmente

Para tanto, procede-se a uma simulação que consiste, basicamente, da aplicação de uma tensão fase-neutro de 120 V - RMS, objetivando, assim, conduzir o reator a um estado apropriado de saturação. A figura 3.12 ilustra o arranjo utilizado.

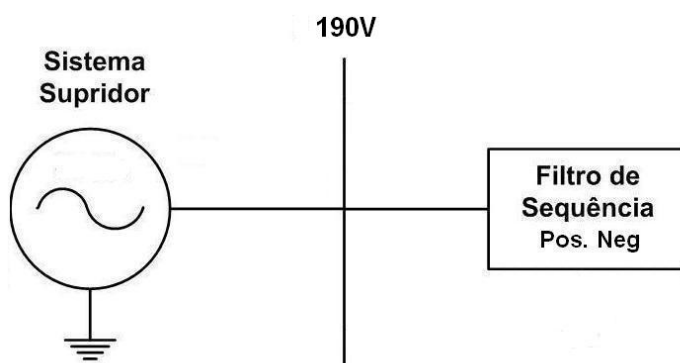


Figura 3.12 - Diagrama unifilar utilizado para a verificação preliminar da eficácia do filtro de seqüência positiva e negativa

A figura 3.13 apresenta as formas de onda das tensões fase-neutro, enquanto que as figuras 3.14 (a) e (b) ilustram as correntes e correspondentes espectros harmônicos na entrada do filtro sob enfoque.

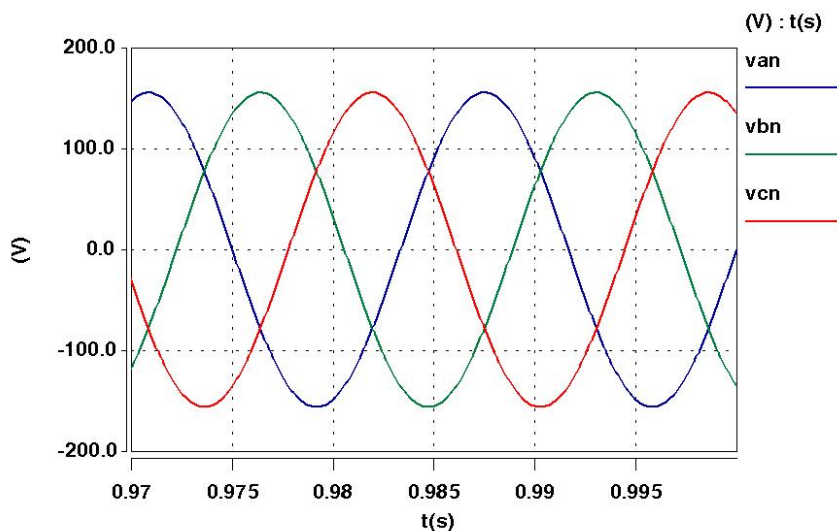
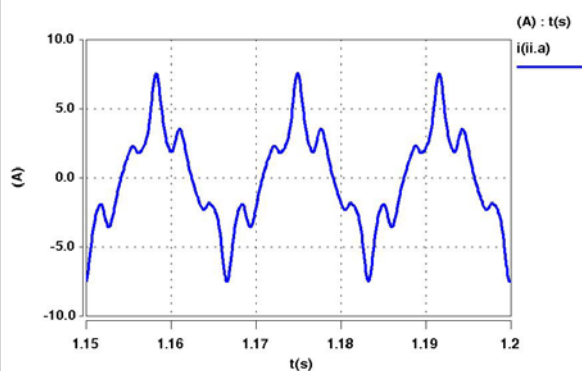
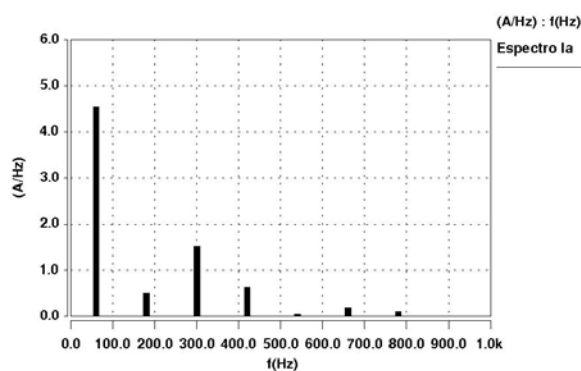


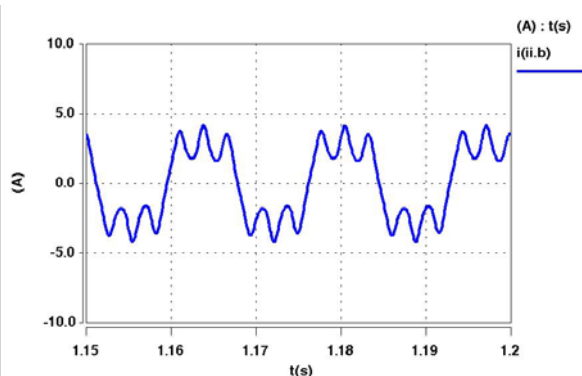
Figura 3.13 - Formas de onda das tensões na entrada do filtro de seqüência positiva e negativa



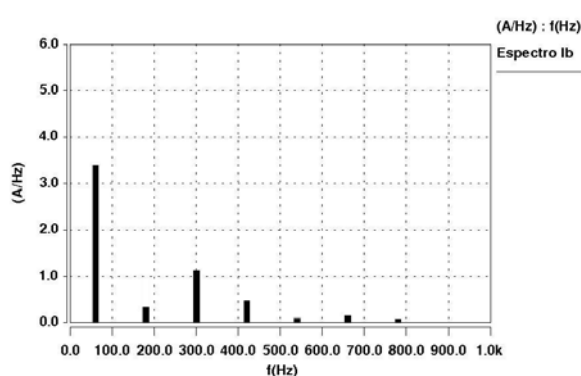
Forma de onda da corrente da linha A



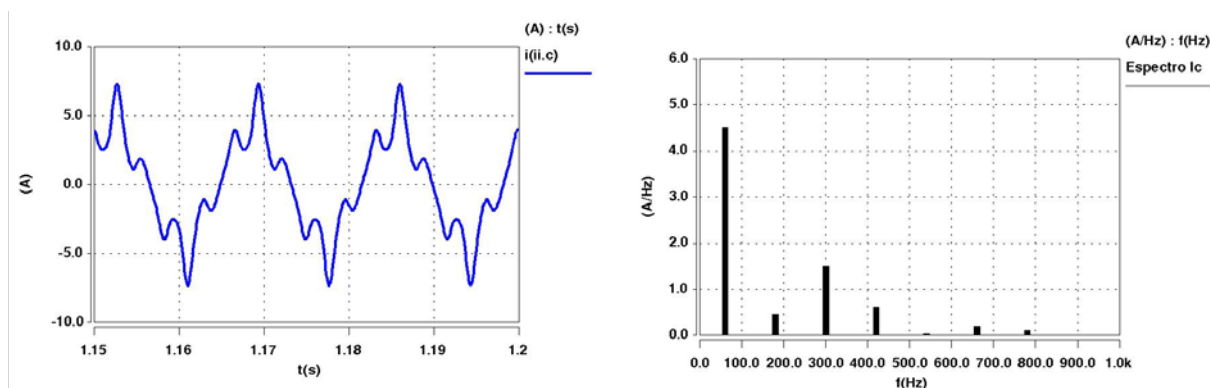
Espectro harmônico da corrente na linha A



Forma de onda da corrente da linha B



Espectro harmônico da corrente na linha B



Forma de onda da corrente da linha C

Espectro harmônico da corrente na linha C

Figura 3.14 - Formas de onda e respectivos espectros harmônicos das correntes de linha na entrada do filtro harmônico de sequência positiva e negativa

Como se percebe, as fases A e C se apresentam com formas de onda semelhantes, enquanto que a fase B possui formato distinto. O motivo para tal se prende à construção planar das colunas magnéticas, como ocorre para qualquer outro dispositivo magnético trifásico. Em consequência desta forma de montagem física, e do fato do dispositivo não estar conectado ao terra do sistema, as componentes de 3ª ordem observadas nas correntes de fase são de sequência positiva e negativa, e não de sequência zero.

3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, direcionado à modelagem computacional dos produtos propostos nesta pesquisa, contemplou os seguintes pontos:

- Apresentação das técnicas voltadas para as modelagens mais comumente empregadas para a representação de dispositivos eletromagnéticos para estudos em sistemas elétricos de potência;

- Definição da metodologia a ser utilizada na pesquisa, a qual recaiu sobre a estratégia fundamentada em modelos que utilizam o princípio da relutância magnética e forças magnetomotrizes;
- Obtenção dos modelos específicos para os filtros eletromagnéticos aqui focados e respectivas implementações computacionais na plataforma selecionada para os trabalhos investigativos;
- Avaliações preliminares do desempenho dos modelos computacionais e respectivos programas através de testes iniciais relacionados com o desempenho físico esperado para os dispositivos.

Dentro do exposto, as principais contribuições oferecidas por este capítulo são explicitadas a seguir:

- Apresentação, de forma sucinta, das principais estratégias passíveis de utilização para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos e definição da metodologia a ser empregada;
- Estabelecimento dos modelos matemáticos para os filtros eletromagnéticos de sequência zero e de sequência positiva e negativa, em consonância com a base computacional escolhida;
- Implementação computacional dos modelos propostos;
- Estudos iniciais avaliativos sobre a eficácia e qualidade da modelagem dos filtros eletromagnéticos investigados na pesquisa.

VALIDAÇÃO DOS MODELOS DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ausência de termos de referência na literatura para fins comprobatórios das estratégias de modelagem computacionais anteriormente apresentadas, conciliada à necessidade do estabelecimento de um processo consistente de validação dos resultados obtidos, consistem na essência deste capítulo.

Dentro deste contexto, este capítulo sintetiza os trabalhos laboratoriais e computacionais feitos para o estabelecimento de termos comparativos entre os resultados indicativos de situações operacionais típicas. Para tanto, foram construídos protótipos dos dispositivos enfocados nesta tese. Assim procedendo e estabelecendo-se a correlação entre as formas de onda e espectros harmônicos obtidos através das duas estratégias estabelecidas, pode-se concluir sobre a eficácia e precisão dos modelos em relação aos desempenhos dos equipamentos reais.

Dentro deste enfoque, o presente capítulo encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Definição dos padrões para o suprimento trifásico dos equipamentos;
- Caracterização dos filtros eletromagnéticos construídos para fins deste trabalho;

- Detalhes dos arranjos laboratoriais utilizados;
- Apresentação de resultados experimentais e computacionais para as correntes de linha e respectivos espectros harmônicos;
- Análise dos resultados obtidos computacional e experimentalmente.

4.2 - FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

Na seqüência são apresentados: o protótipo do filtro de seqüência zero, o arranjo laboratorial utilizado para os testes e, por fim, os resultados comparativos de desempenho do filtro sob enfoque.

4.2.1 - PROTÓTIPO DO FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

O protótipo construído para fins de filtragem de correntes de seqüência zero é mostrado na figura 4.1 e suas características construtivas são apresentadas na tabela 4.1.



Figura 4.1 - Protótipo do filtro eletromagnético de seqüência zero

Tabela 4.1 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência zero

Grandeza	Valor
Tensão fase-fase (V)	220 V
Potência trifásica (S)	2000 VA
Número de espiras dos enrolamentos I e II (n)	133
Seção transversal do núcleo (A)	26,49 cm ²
Fator de empilhamento	0,95
Comprimento médio da coluna magnética (l)	18,1 cm
Comprimento médio das culatras (l _{cul})	3,2 cm
Impedância de dispersão para 60Hz (Z _{disp})	0,1704 Ω

Embora a operação do filtro de seqüência zero ocorra na região linear, é importante a extração de informações relacionadas com a corrente de magnetização do mesmo quando da alimentação nominal. Isto se faz necessário para a obtenção da curva de histerese magnética real do produto, a partir da qual torna-se viável a extração dos parâmetros exigidos pelo modelo do laço de histerese utilizado [54].

Em valores instantâneos, a relação entre a corrente de magnetização do reator (i) e o campo magnético do núcleo (h) é dada pela Lei de Ampère (4.1):

$$h(t) = \frac{n \cdot i(t)}{l_0} \quad (4.1)$$

Onde:

n - Número de espiras do enrolamento do filtro;

*l*₀ - Comprimento médio do caminho magnético [m], dado por: $l_0 = 2 \cdot l + 2 \cdot l_{cul}$;

i - Corrente instantânea de magnetização do reator [A];

h - Intensidade do campo magnético instantâneo [A/m].

Das leis de Faraday e Lenz podem-se escrever as equações (4.2) e (4.3):

$$v(t) = - \frac{n \cdot d\varphi(t)}{dt} \quad (4.2)$$

$$\varphi(t) = - \frac{1}{n} \int_0^t v(t) \quad (4.3)$$

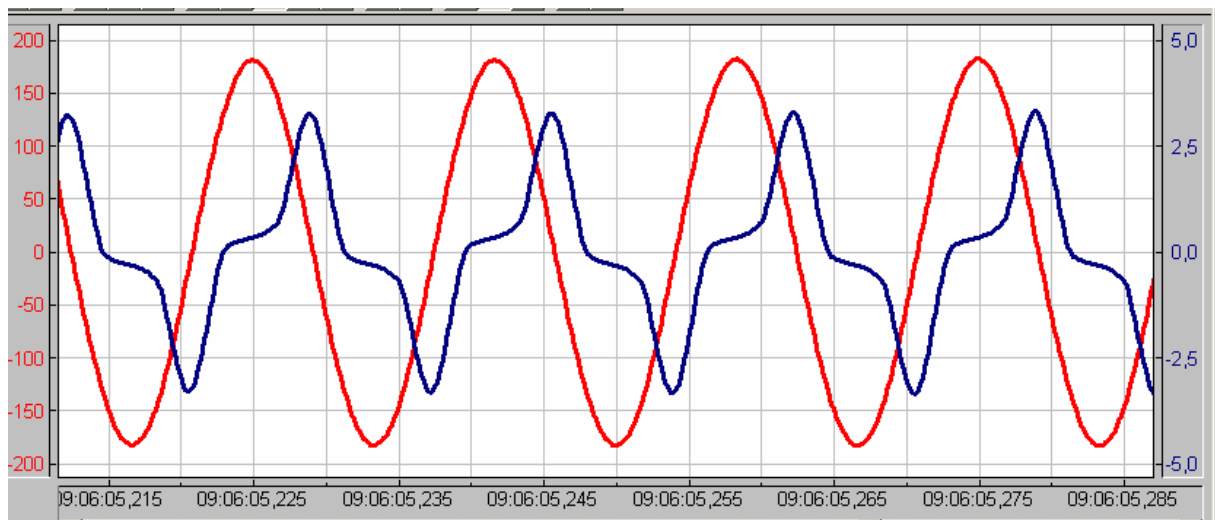
Onde:

$\varphi(t)$ - Fluxo magnético instantâneo;

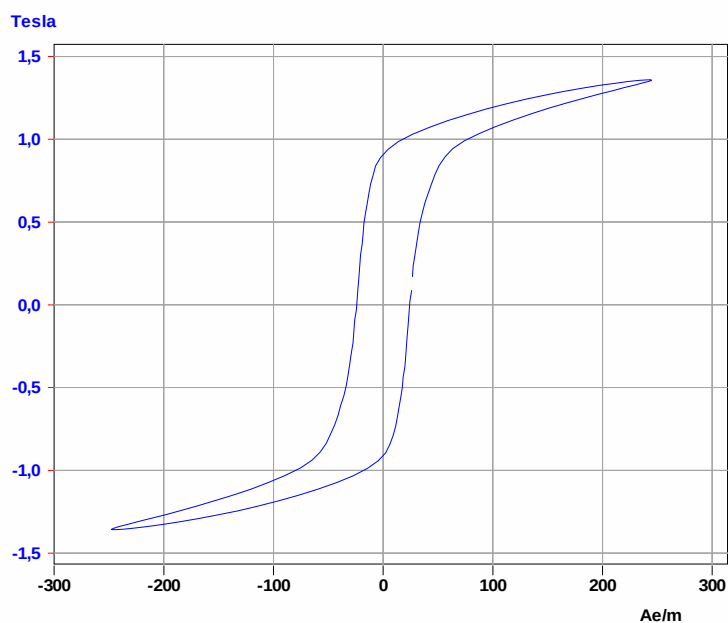
$v(t)$ - Tensão instantânea aplicada ao filtro.

O sinal negativo na equação (4.3) está em concordância com a lei de Lenz. Para fins deste trabalho, o sinal pode ser desconsiderado, uma vez que os desenvolvimentos empregam apenas os valores absolutos.

Utilizando uma excitação magnética associada com a aplicação da tensão nominal do dispositivo, é possível a obtenção do laço de histerese. O fluxo magnético foi obtido pela integração numérica da tensão a partir de um software de processamento de sinais. A figura 4.2 apresenta os resultados experimentais obtidos para: a tensão aplicada ao dispositivo e a corrente de magnetização requerida pelo mesmo (a) e o laço de histerese resultante da combinação destas duas grandezas (b).



(a) Forma de onda da tensão aplicada e da corrente de magnetização do filtro de sequência zero



(b) Laço de histerese

Figura 4.2 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de seqüência zero

Em consonância com os requisitos impostos pelo modelo do laço de histerese empregado pelo programa, a partir das informações anteriores, é viável a extração das grandezas sintetizadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência zero

Grandeza	Valor
Permeabilidade inicial relativa (μ_i)	1800
Permeabilidade coerciva relativa (μ_{hc})	15120
Densidade de fluxo residual (b_r)	0,9 [T]
Força coerciva (h_c)	35 [Ae/m]
b_{max}	1,64 [T]
h_{max}	422 [Ae/m]
b_{sat}	1,35 [T]
h_{sat}	250 [Ae/m]

4.2.2 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Esta seção apresenta e discute os resultados laboratoriais e computacionais voltados para o processo de validação do filtro de seqüência zero, operando sob condições ideais de funcionamento.

Para tanto, foi montado um arranjo laboratorial constituído, fundamentalmente, por: uma fonte de suprimento trifásica controlada HP6834 de 4,5kVA; uma carga não-linear e; pelo filtro eletromagnético sob enfoque. A carga é constituída por três retificadores monofásicos, formando uma unidade trifásica, com o neutro interligado ao neutro do sistema. Isto permite a circulação dos harmônicos de seqüência zero, conforme requerido pela metodologia aqui contemplada. A figura 4.3 mostra o arranjo laboratorial utilizado para o ensaio do protótipo, enquanto que a figura 4.4 é indicativa do correspondente diagrama unifilar.

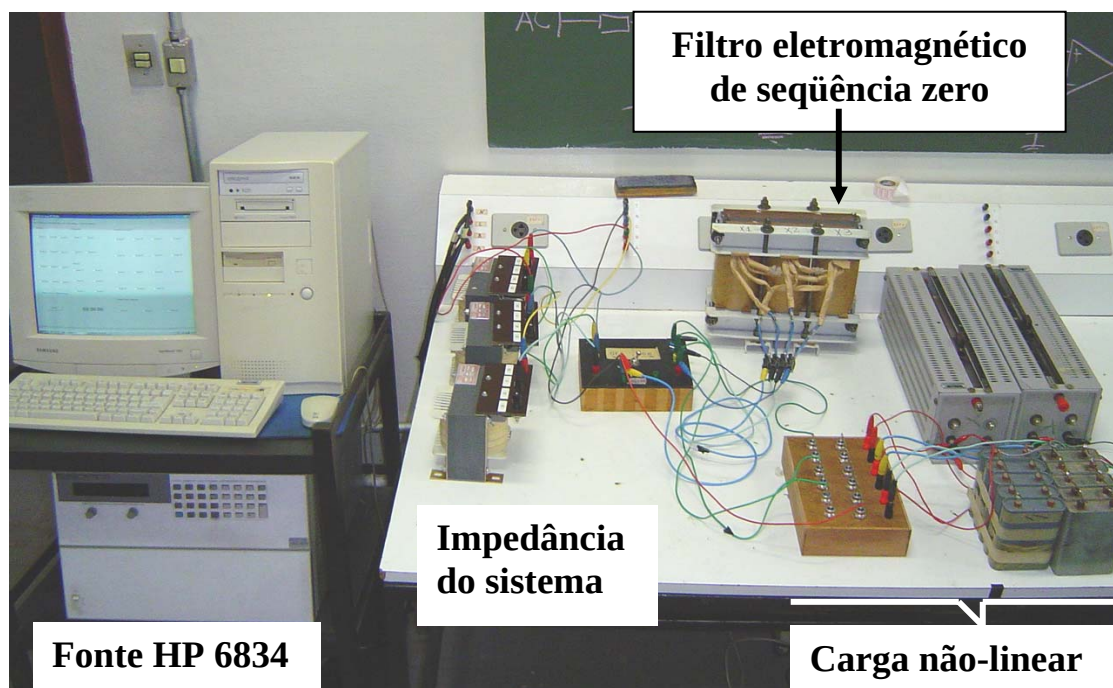


Figura 4.3 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência zero

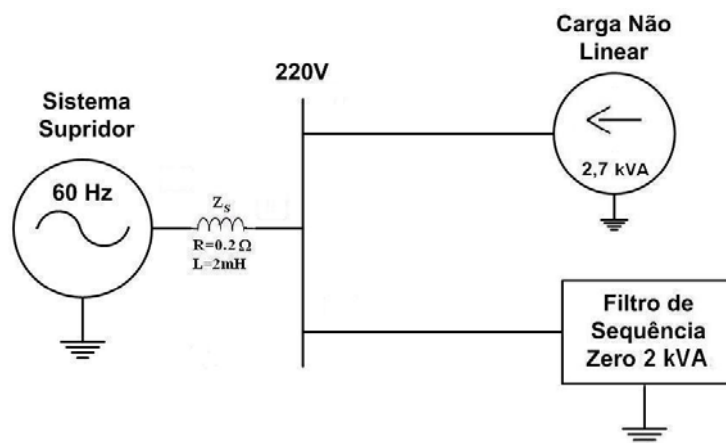


Figura 4.4 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.3

Os pontos de monitoração selecionados, as grandezas registradas e as correspondentes figuras ilustrativas são sintetizados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência zero

Local da medição	Resultado apresentado	Figura
(a) Carga não-linear	Correntes de fase A, B e C	4.7
	Espectro harmônico A, B e C	4.8
(b) Alimentador	Correntes de fase A, B e C	4.9
	Espectro harmônico A, B e C	4.10
(c) Filtro de seqüência zero	Correntes de fase A, B e C	4.11
	Espectro harmônico A. B e C	4.12

O registro destas grandezas foi realizado através do sistema de aquisição de dados identificado na figura 4.6 e constituído por:

- Sensores e canais de entrada: 3 ponteiras de tensão e 9 *clamp*'s de corrente (total de 12 canais) destinados a enviar os sinais elétricos externos à placa de aquisição;

- Placa de aquisição: recebe os sinais provenientes dos sensores e canais de entrada e realiza a digitalização dos sinais (conversão A/D). O cartão, do fabricante Quatech, modelo DAQP-12, é uma placa de controle e aquisição de dados para computadores e *notebooks*, com taxa de amostragem de 100kHz. A foto do cartão utilizado é mostrada na figura 4.5.



Figura 4.5 - Foto ilustrativa do cartão de aquisição de dados DAQP-12

- Notebook: após a obtenção dos dados digitais que representam os sinais amostrados, o microcomputador armazena em memória os sinais na forma de janelas. Durante o processo de medição, estes dados são armazenados em disco rígido, através do software de controle e processamento de sinais DasyLab 4.0 - IOTec. As janelas de sinais se referem à aquisição digital de acordo com a taxa de amostragem selecionada. Neste caso, utilizou-se 128 pontos representando 1 ciclo de medição.

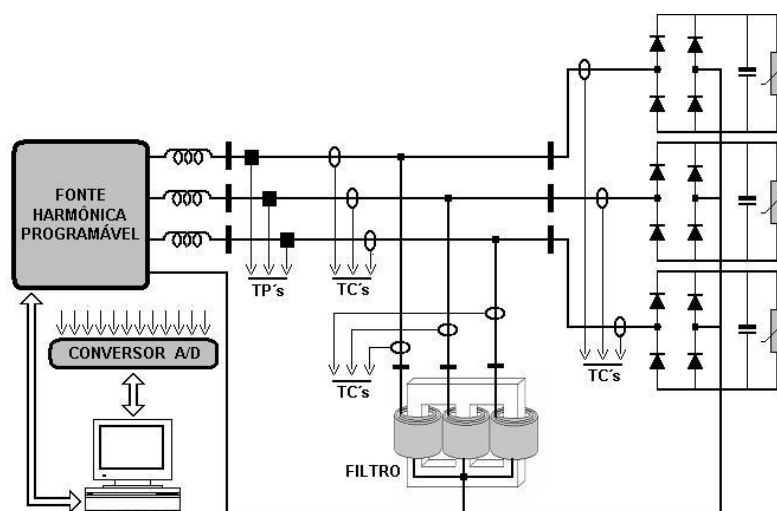
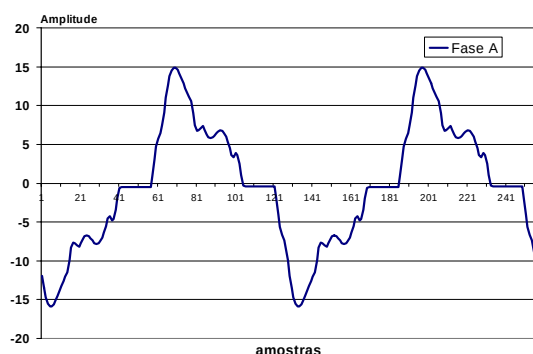


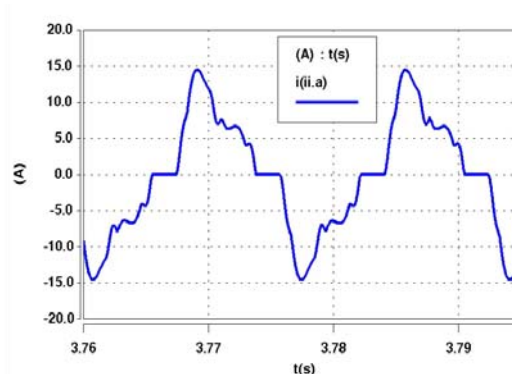
Figura 4.6 - Diagrama trifásico utilizado para o registro das grandezas elétricas

(a) Corrente na carga não-linear

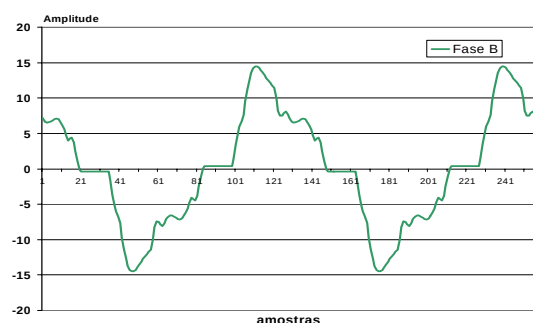
A figura 4.7 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C na entrada da carga não-linear. Ambos os resultados, experimental e computacional, são adicionados para fins de inspeção visual e estabelecimento dos termos comparativos.



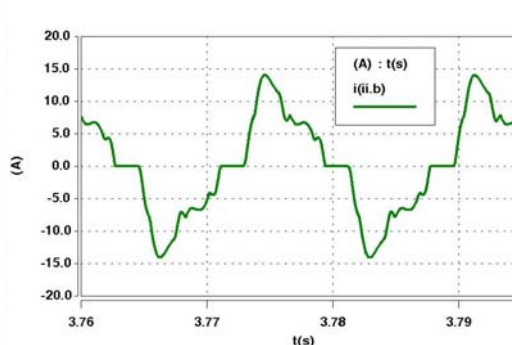
Linha A - carga não-linear - experimental



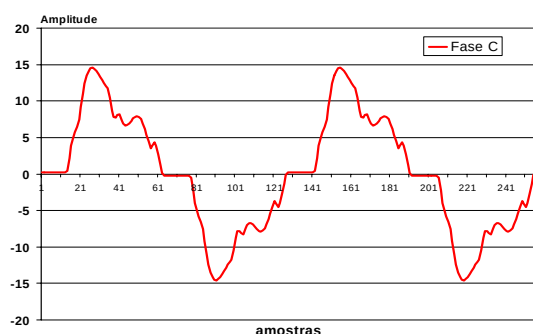
Linha A - carga não-linear - computacional



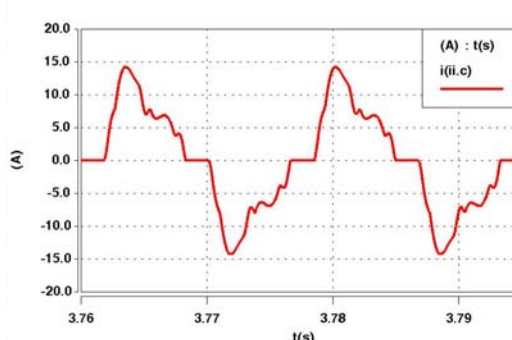
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



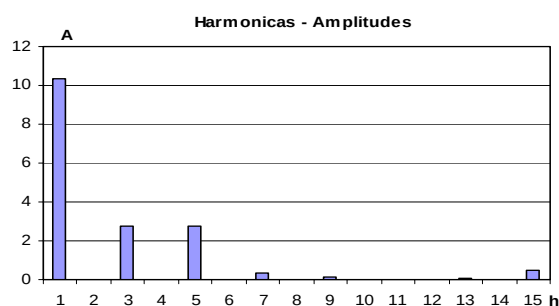
Linha C - carga não-linear - experimental



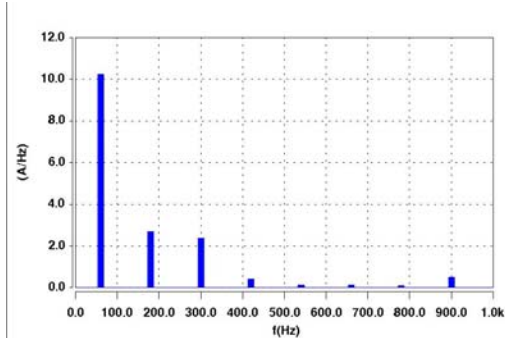
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 4.7 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de sequência zero

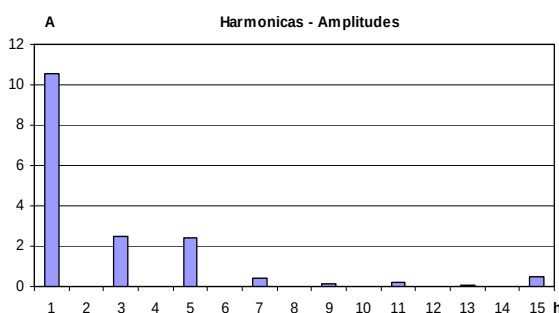
Complementarmente, a figura 4.8 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico anteriores.



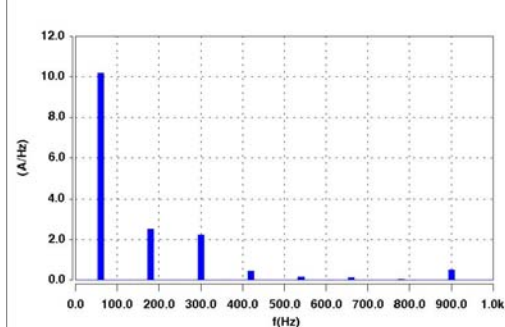
Linha A - carga não-linear - experimental



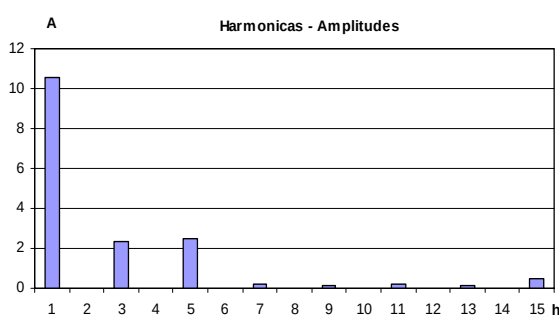
Linha A - carga não-linear - computacional



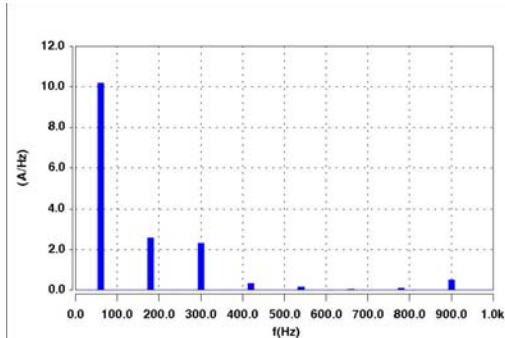
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

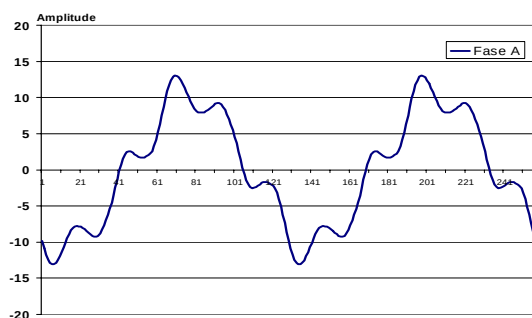


Linha C - carga não-linear - computacional

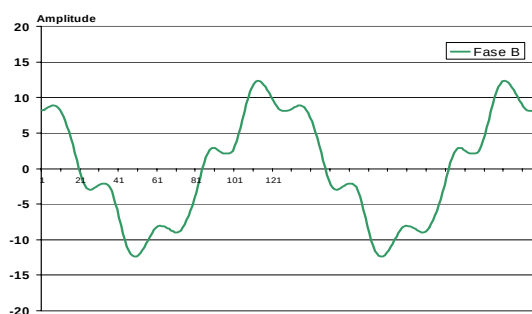
Figura 4.8 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

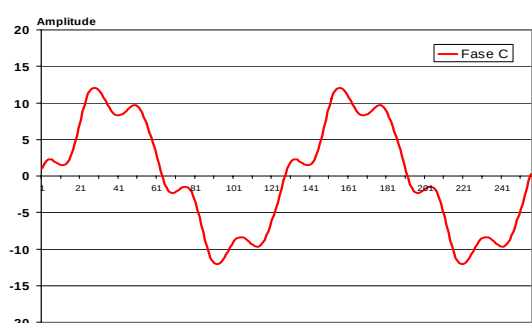
A figura 4.9 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C no alimentador. Novamente, os resultados experimental e computacional são destacados para os fins aqui almejados.



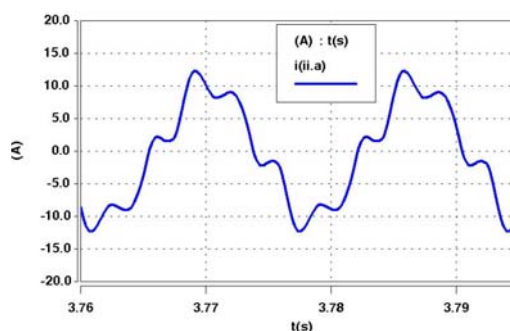
Linha A - alimentador - experimental



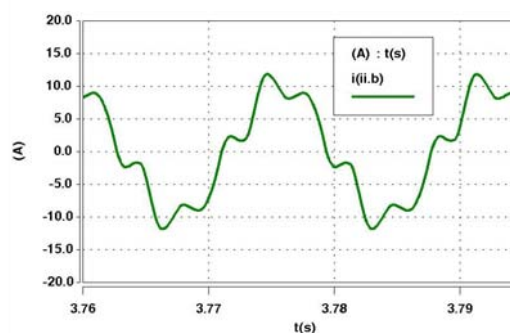
Linha B - alimentador - experimental



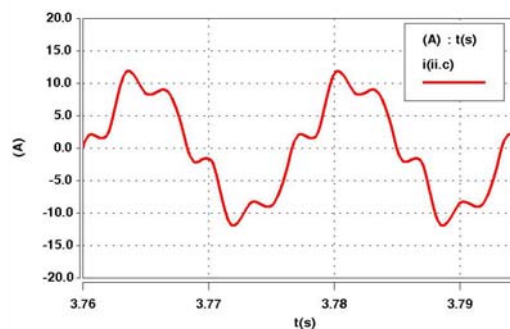
Linha C - alimentador - experimental



Linha A - alimentador - computacional



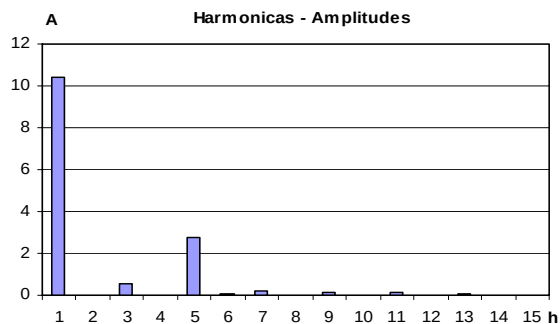
Linha B - alimentador - computacional



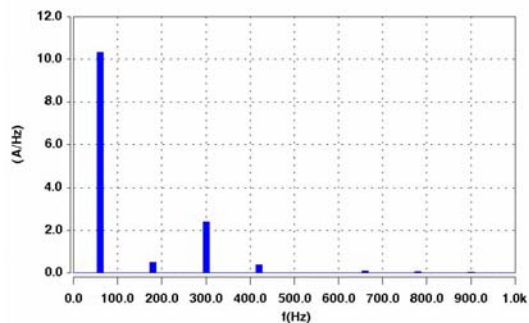
Linha C - alimentador - computacional

Figura 4.9 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

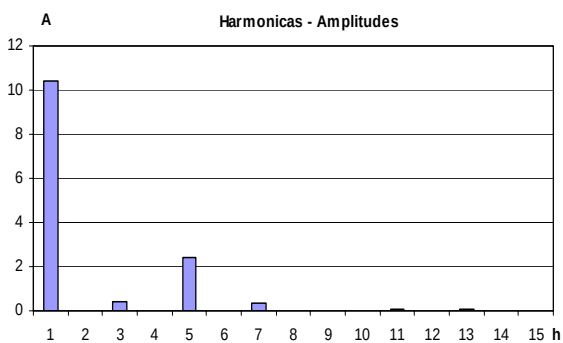
Complementarmente, a figura 4.10 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



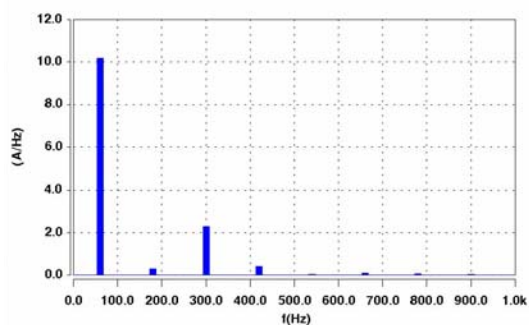
Linha A - alimentador - experimental



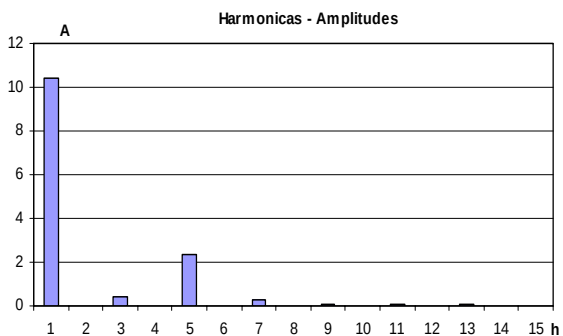
Linha A - alimentador - computacional



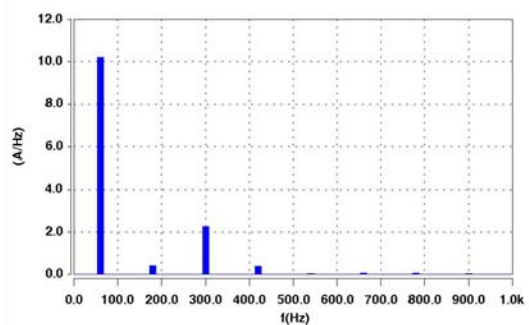
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

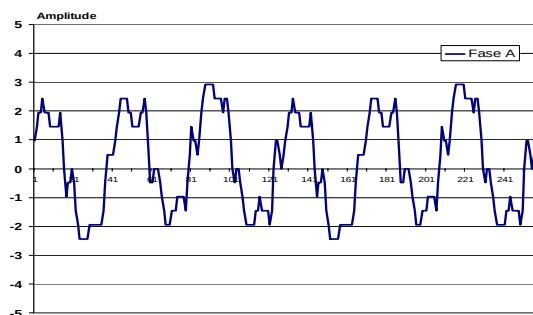


Linha C - alimentador - computacional

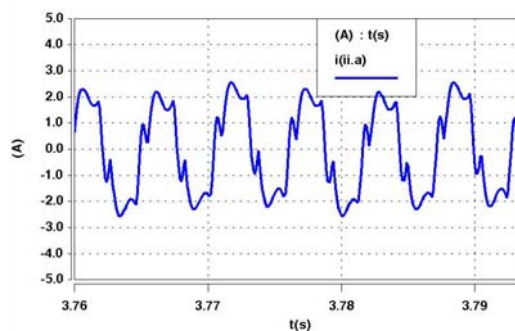
Figura 4.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

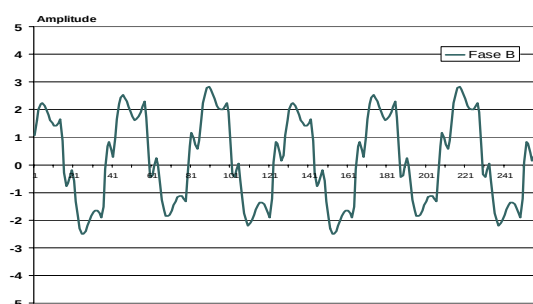
Por fim, a figura 4.11 apresenta as correntes de linha A, B e C no filtro eletromagnético. Objetivando, mais uma vez, o estabelecimento de termos comparativos, ambos os resultados, experimental e computacional, são evidenciados.



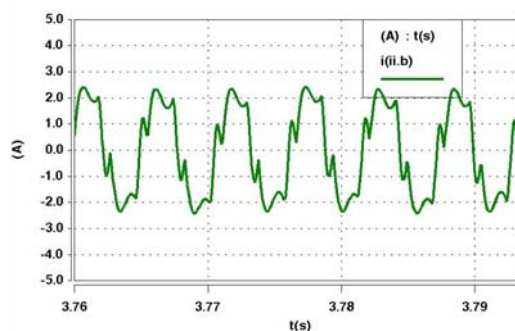
Linha A - filtro - experimental



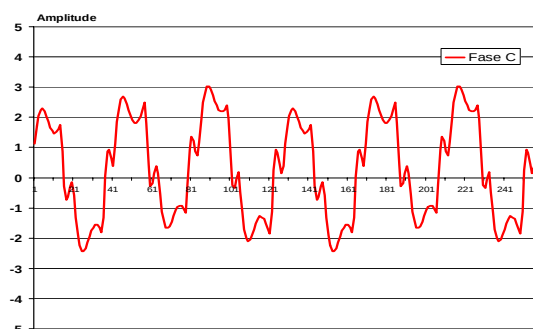
Linha A - filtro - computacional



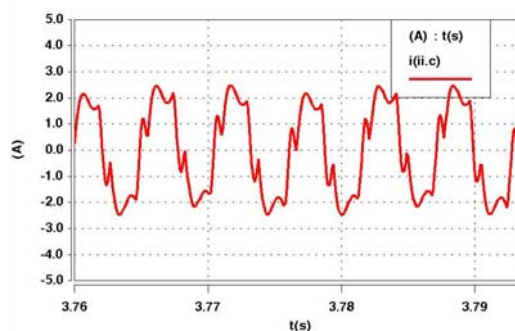
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



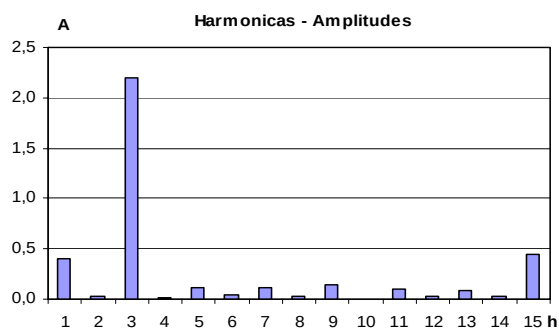
Linha C - filtro - experimental



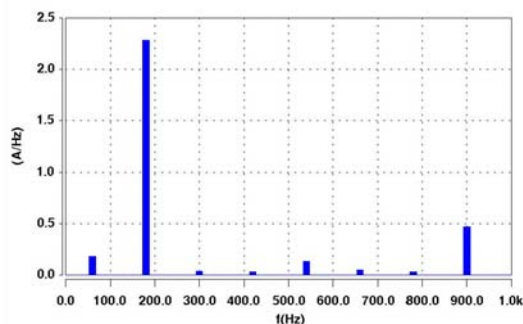
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.11 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

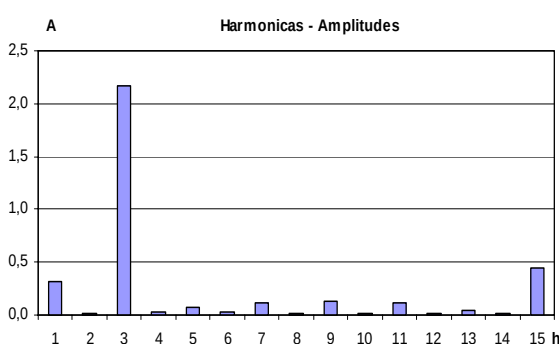
Ainda, a figura 4.12 indica os correspondentes espectros harmônicos.



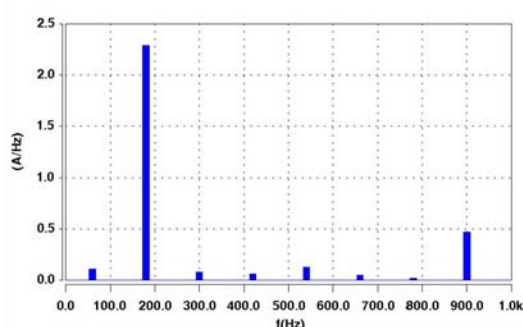
Linha A - filtro - experimental



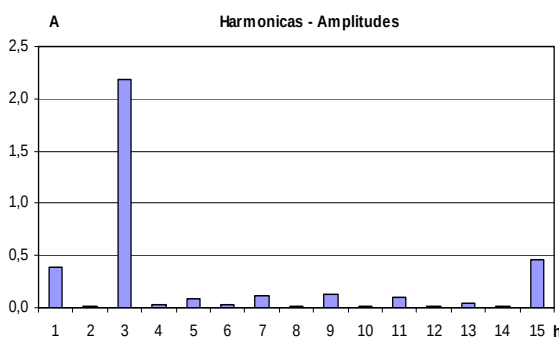
Linha A - filtro - computacional



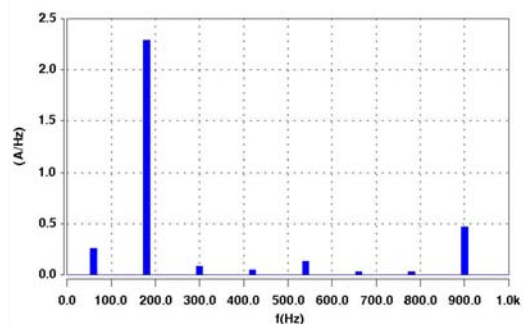
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental



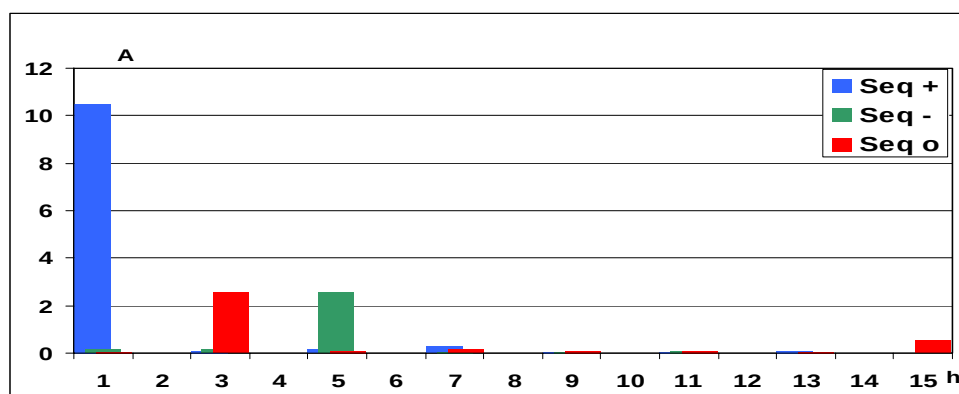
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

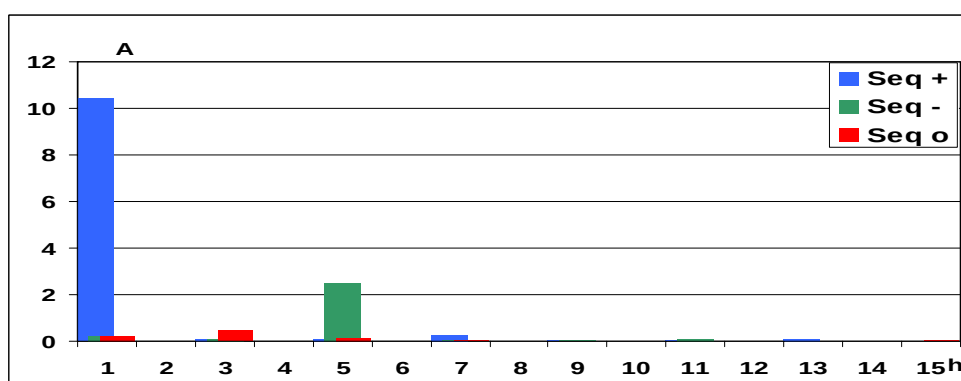
(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

Objetivando fornecer maiores detalhes do desempenho do filtro, a figura 4.13 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das

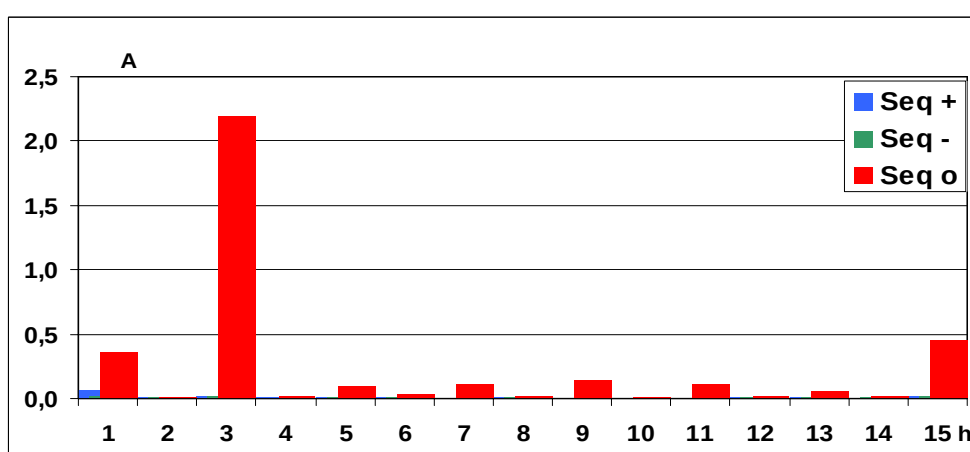
correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados e as cores destacam a sequência de fases da componente harmônica sob foco.



(a) Seqüência de fases para as correntes de linha na carga - experimental



(b) Seqüência de fases para as correntes de linha no alimentador - experimental

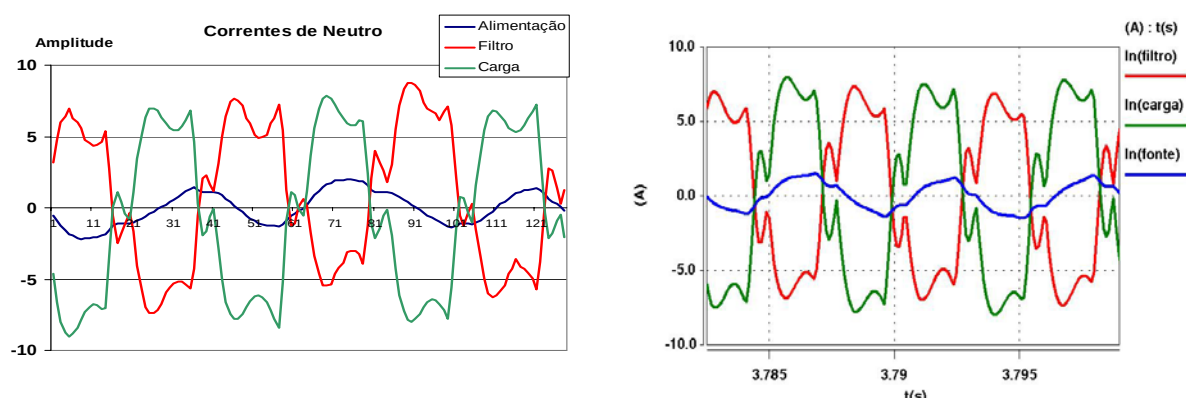


(c) Seqüência de fases para as correntes de linha no filtro - experimental

Figura 4.13 - Espectros harmônicos com distribuição seqüencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência zero

(e) Corrente no neutro da carga não-linear, alimentador e filtro

De modo a proporcionar meios para uma melhor visualização da eficácia do filtro e ainda, constatar a operacionalidade do mesmo no que tange à absorção das componentes de sequência zero, apresenta-se, a seguir, os resultados associados com as **correntes no neutro** para as três partes envolvidas no processo: carga, alimentador e filtro. A figura 4.14 ressalta que a corrente de neutro ficou praticamente confinada à malha de circulação formada pela carga e filtro. O resíduo de corrente ainda circulante pelo neutro do alimentador está associado aos fenômenos já discutidos anteriormente.



Correntes de neutro - experimental

Correntes de neutro - computacional

Figura 4.14 - Formas de onda das correntes de neutro na carga, no alimentador e no filtro - suprimento de tensão ideal - filtro de sequência zero

4.2.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 4.4 resume os principais resultados anteriores e permite uma análise do processo de validação como um todo.

Tabela 4.4 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de sequência zero sob condições ideais de suprimento

Local	Grandeza		Simulação			Experimental			Diferença (%)		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
Corrente na carga não-linear	Valor eficaz (A)		7,7	7,6	7,6	7,8	7,8	7,8	1,3	2,6	2,6
	Harmônicas mais significativas (%)	3 ^a	26,3	24,7	24,9	26,7	23,4	22,9	1,5	5,5	8,7
		5 ^a	23,3	21,9	22,6	24,4	22,6	23,4	4,5	3,1	3,4
		7 ^a	3,6	4,2	3,5	3,4	3,9	3,1	5,9	7,7	12,9
	DIHT (%)		36,1	33,8	34,4	38,3	33,4	33,1	5,7	1,2	3,9
Corrente no alimentador	Valor eficaz (A)		7,5	7,4	7,4	7,6	7,6	7,6	1,3	2,6	2,6
	Harmônicas mais significativas (%)	3 ^a	5,1	4,0	4,1	5,6	4,2	4,2	8,9	4,8	2,4
		5 ^a	23,1	22,4	22	26,1	23,3	22,9	11,5	3,9	3,9
		7 ^a	3,3	4,1	3,0	2,9	3,7	2,9	13,8	10,8	3,4
	DIHT (%)		25	23,1	23,1	26,9	23,9	23,5	7,1	3,3	1,7
Corrente no filtro eletromagnético	Valor eficaz (A)		1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	6,3	6,3	6,3
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	4,5	4,5	4,5
		9 ^a	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0	8,3	8,3
		15 ^a	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,47	2,2	2,2	0

Focando especificamente os resultados mostrados anteriormente para uma das linhas do sistema trifásico, constata-se que:

- As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais em torno de 38,3%;
- Quando da inserção do filtro de sequência zero, a nova distorção total da corrente de linha do lado do supridor passou para 26,9%. Vale ressaltar que esta proporção corresponde, praticamente, ao conteúdo de 5º harmônico, a qual, como se sabe, não

se constitui numa frequência factível de filtragem pelo dispositivo aqui considerado.

Todavia, a redução de cerca de 30% da distorção harmônica total de corrente já evidencia um substancial ganho advindo da filtragem ora considerada;

- No que tange às correntes encontradas nas linhas do filtro, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo demonstrou sua eficácia no sentido de absorver as componentes harmônicas de sequência zero, promovendo, assim, a atenuação da injeção harmônica no alimentador;
- Os resultados computacionais e experimentais, de um modo geral, evidenciaram uma boa correlação quantitativa e qualitativa, como observado através das formas de onda e valores obtidos. Desta forma, fica evidenciado que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do dispositivo focado nesta fase da pesquisa, qual seja, o filtro de sequência zero.

Deve-se ressaltar que, embora os resultados computacionais e experimentais apresentem boa concordância, é de se esperar alguns desvios que possam justificar diferenças de resultados. Estes são, dentre outros motivos: imprecisões paramétricas, negligências de componentes parasitas, erros do sistema de medição e aquisição de dados, modelagem de alguns dispositivos como ideais, etc.. Todavia, de um modo geral, não se constatou maiores discrepâncias que viessem a comprometer o processo de validação efetivado.

4.3 - FILTRO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

As análises que seguem estão imbuídas do propósito de se avaliar as características elétricas e magnéticas do filtro de sequência positiva e negativa, assim como também dos estudos de seu desempenho operacional.

Objetivando o atendimento a tais metas, são apresentados a seguir:

- O protótipo do filtro;
- O arranjo laboratorial utilizado para os testes;
- Os resultados comparativos de desempenho do mesmo.

4.3.1 - PROTÓTIPO DO FILTRO DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA

O protótipo construído para fins de filtragem de correntes de sequência positiva e negativa é mostrado na figura 4.15. Suas características construtivas são apresentadas na tabela 4.5.



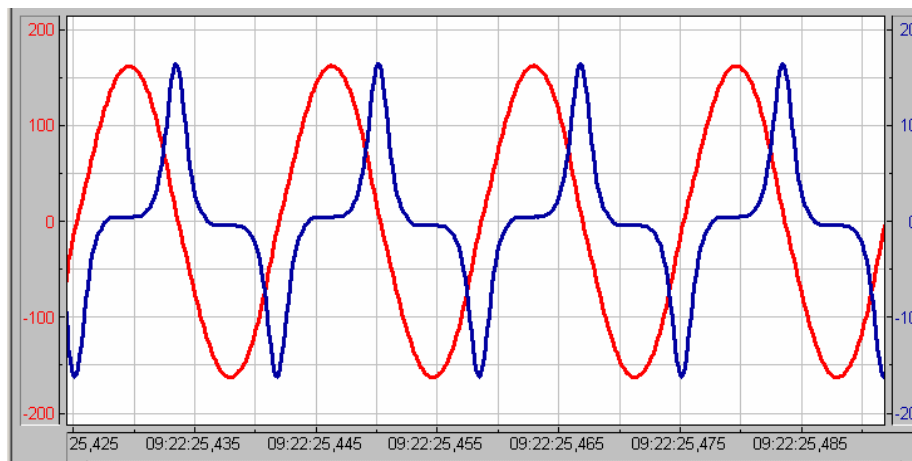
Figura 4.15 - Protótipo do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa

Tabela 4.5 - Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro de seqüência positiva e negativa

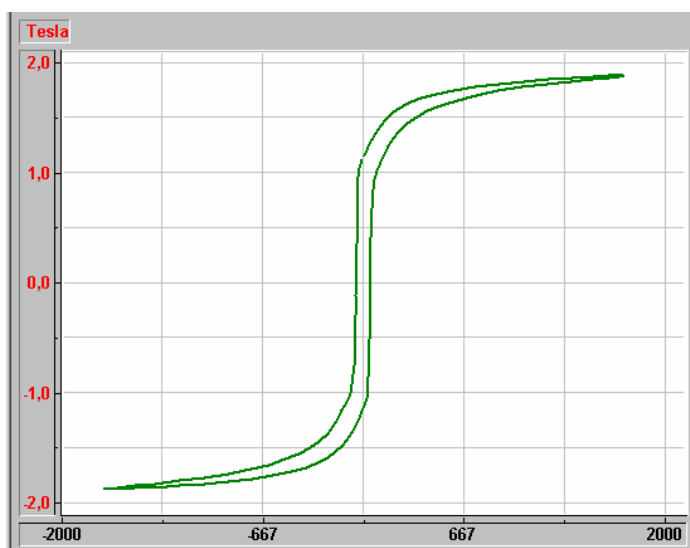
Grandeza	Valor
Tensão fase-fase (V)	190 V
Potência trifásica (S)	3000 VA
Número de espiras	116
Seção transversal do núcleo (A)	19,488 cm ²
Fator de empilhamento	0,95
Comprimento médio da coluna magnética (l)	19,5 cm
Comprimento médio das culatras (l_{cul})	8,0 cm

De modo a prosseguir com as análises, tal como aconteceu para o filtro de seqüência zero, o primeiro passo consiste na obtenção das informações relacionadas com a corrente de magnetização do filtro de seqüência positiva e negativa, quando o dispositivo encontra-se suprido por uma tensão nominal e ideal. Esta medida é relevante ao processo de obtenção da curva de histerese magnética real do produto, visto que o funcionamento do mesmo como filtro harmônico se fundamenta justamente na sua operação sob condições saturadas. A partir da curva de histerese, torna-se viável a extração dos parâmetros exigidos pelo modelo do laço de histerese utilizado [54].

Reportando às equações 4.1, 4.2 e 4.3 e utilizando uma excitação magnética associada com a aplicação da tensão nominal do dispositivo, obtêm-se as formas de onda do processo de excitação e o laço de histerese, indicados nas figuras 4.16(a) e (b).



(a) Forma de onda da tensão aplicada e da corrente de magnetização do filtro de sequência positiva e negativa



(b) Laço de histerese

Figura 4.16 - Formas de onda da tensão, corrente e laço de histerese obtidos no filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa

Com base nos requisitos impostos pelo modelo do laço de histerese empregado pelo programa e a partir das informações da tabela 4.5, torna-se possível a extração das grandezas sintetizadas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características obtidas a partir da curva de histerese do filtro de seqüência positiva e negativa

Grandeza	Valor
Permeabilidade inicial relativa (μ_i)	2500
Permeabilidade coerciva relativa (μ_{hc})	60000
Densidade de fluxo residual (b_r)	1,2 [T]
Força coerciva (h_c)	79 [Ae/m]
b_{max}	1,8 [T]
h_{max}	1700 [Ae/m]
b_{sat}	1,7 [T]
h_{sat}	1000 [Ae/m]

4.3.2 - VALIDAÇÃO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Prosseguindo com os estudos, as análises a seguir avaliam os resultados laboratoriais e computacionais, objetivando, principalmente, o processo de validação do filtro de seqüência positiva e negativa, operando sob condições ideais.

Para tanto, foi montado um arranjo laboratorial constituído, fundamentalmente, por:

- Uma fonte de suprimento trifásica controlada HP6834 de 4,5kVA (mesma utilizada nos estudos anteriores);
- Uma carga não-linear;
- O filtro eletromagnético sob enfoque com o dispositivo defasador conectado em série com o mesmo.

A carga não-linear é constituída por um retificador trifásico não-controlado, cujo conteúdo harmônico presente nas correntes é dado por $6k \pm 1$, sendo $k \in \mathbb{I}^+$. Dessa forma, as

principais componentes harmônicas são de 5ª e 7ª ordens, conforme requerido pela metodologia aqui contemplada.

A figura 4.17 mostra o arranjo laboratorial utilizado para o ensaio do protótipo, enquanto que a figura 4.18 é indicativa do correspondente diagrama unifilar.

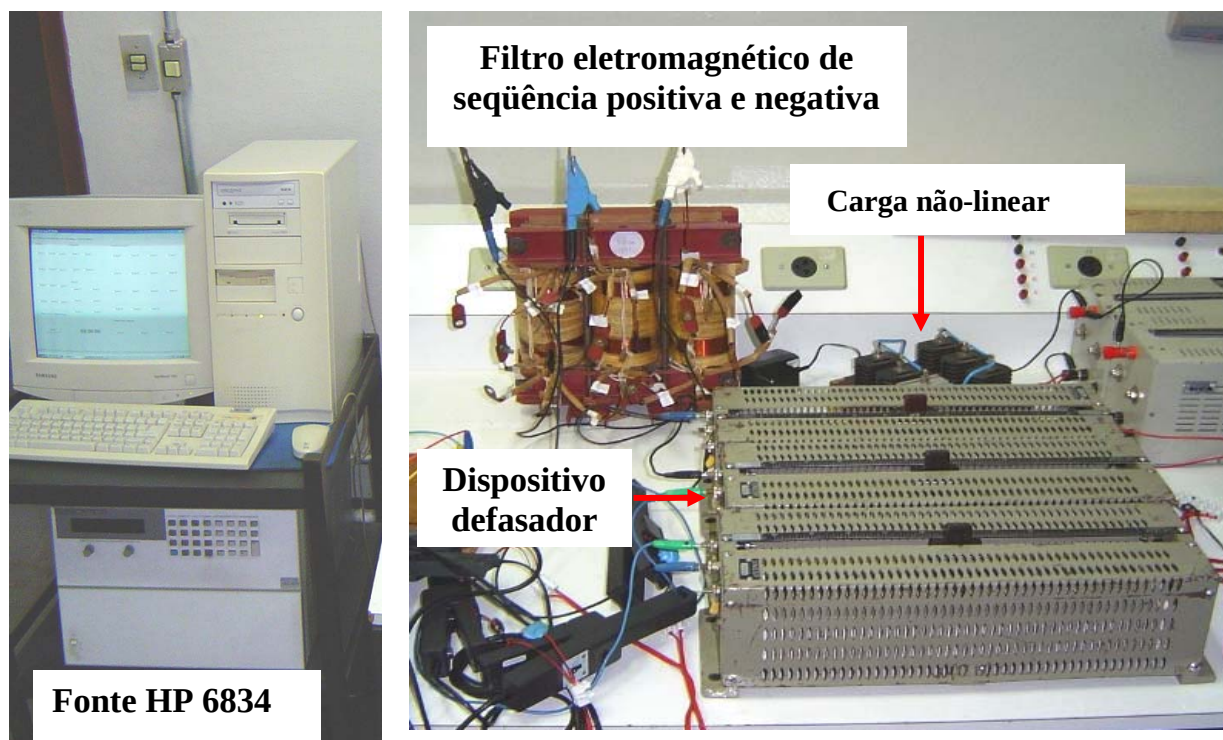


Figura 4.17 - Arranjo experimental para os ensaios do filtro eletromagnético de seqüência positiva e negativa

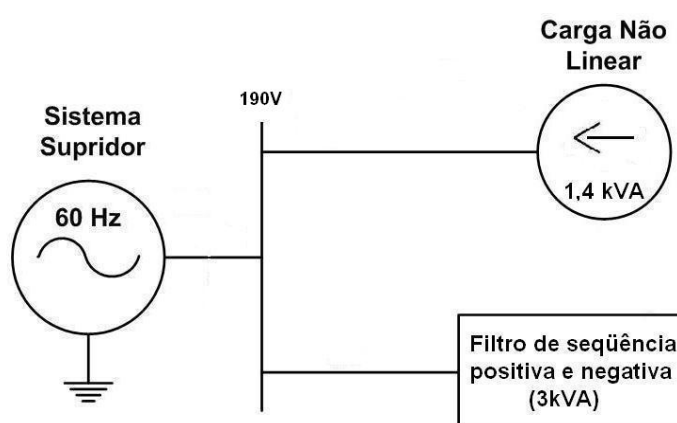


Figura 4.18 - Diagrama unifilar correspondente à figura 4.17

Os pontos de monitoração selecionados, as grandezas registradas e as correspondentes figuras ilustrativas são sintetizados na tabela 4.7. Estas grandezas foram monitoradas utilizando o mesmo sistema de aquisição de dados apresentado anteriormente, dispensando, portanto, maiores detalhes nesta seção.

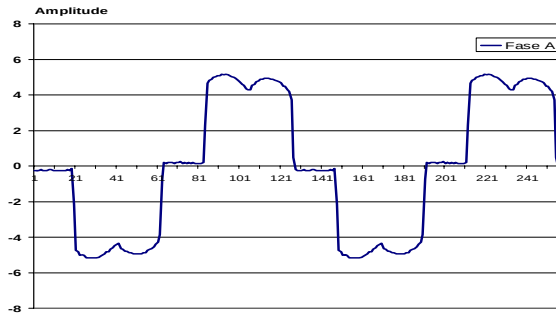
Tabela 4.7 - Síntese das medições utilizadas para validação do modelo computacional - filtro de seqüência positiva e negativa

Local da medição	Resultado apresentado	Figura
(a) Carga não-linear	Correntes de fase A, B e C	4.19
	Espectro harmônico A, B e C	4.20
(b) Alimentador	Correntes de fase A, B e C	4.21
	Espectro harmônico A, B e C	4.22
(c) Filtro de seqüência positiva e negativa	Correntes de fase A, B e C	4.23
	Espectro harmônico A, B e C	4.24

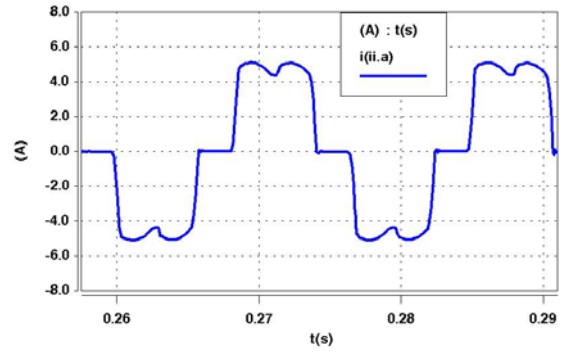
(a) Corrente na carga não-linear

A figura 4.19 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C na carga não-linear. Tal como foram apresentados para a estratégia de filtragem de seqüência zero, ambos os resultados, experimental e computacional, são adicionados para fins de inspeção visual e estabelecimento dos termos comparativos.

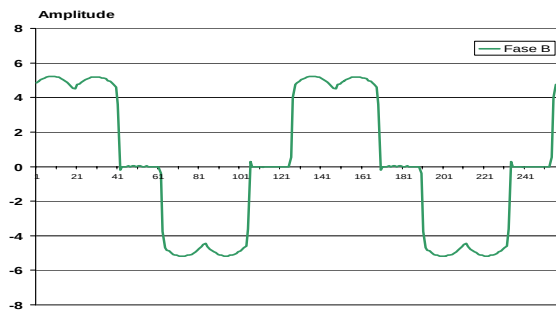
Complementarmente, a figura 4.20 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico anteriores.



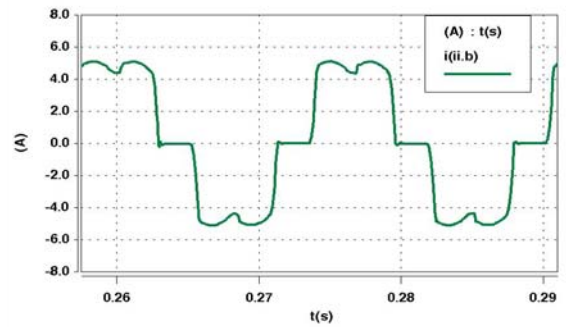
Linha A - carga não-linear - experimental



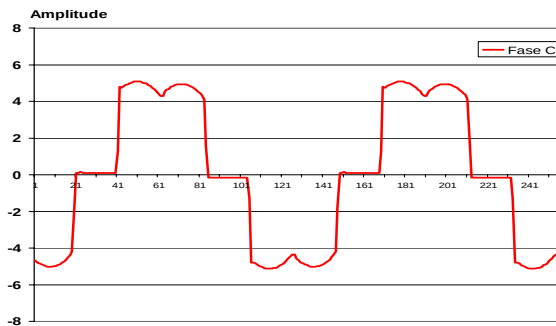
Linha A - carga não-linear - computacional



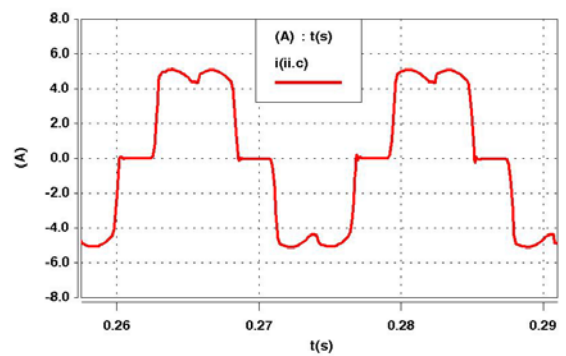
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional

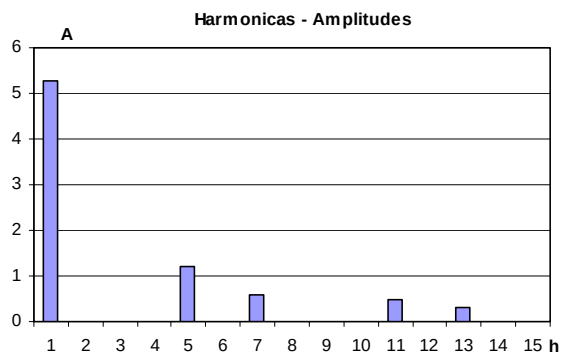


Linha C - carga não-linear - experimental

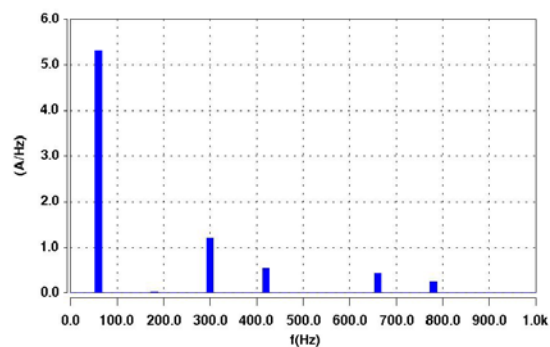


Linha C - carga não-linear - computacional

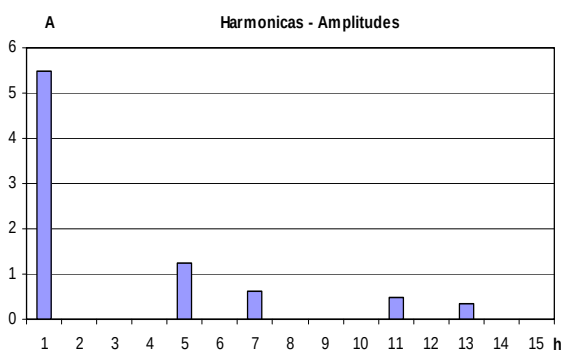
Figura 4.19 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de sequência positiva e negativa



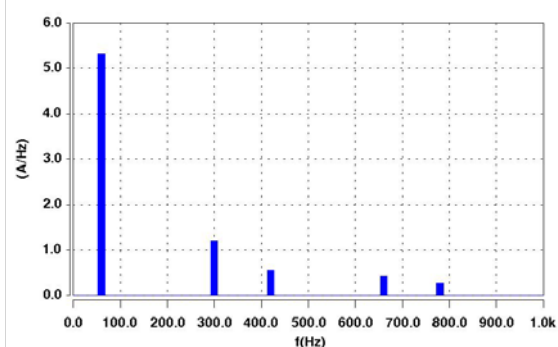
Linha A - carga não-linear - experimental



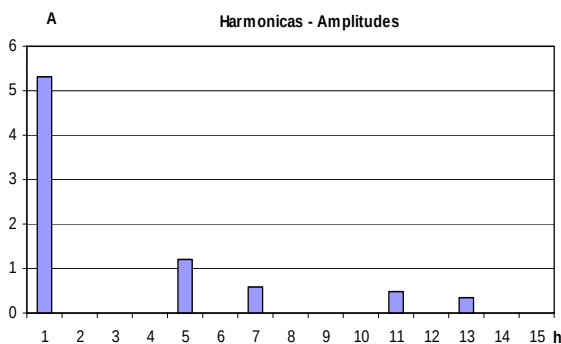
Linha A - carga não-linear - computacional



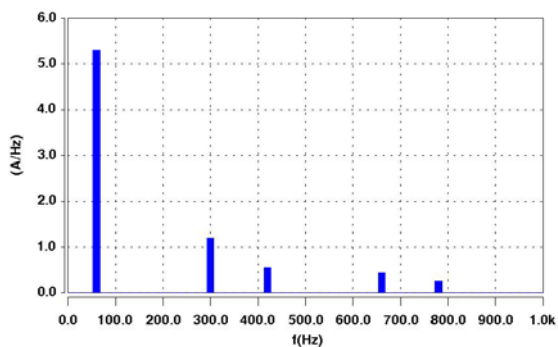
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

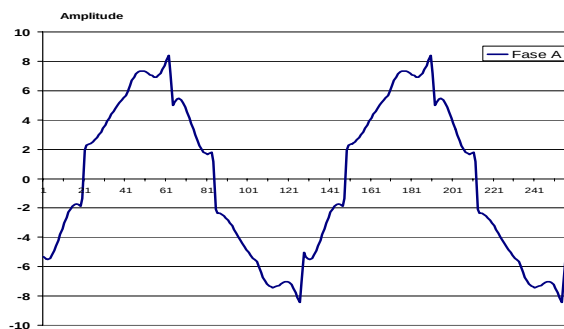


Linha C - carga não-linear - computacional

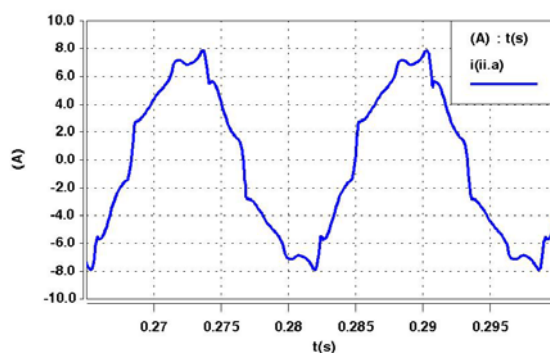
Figura 4.20 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

(b) Corrente de linha no alimentador

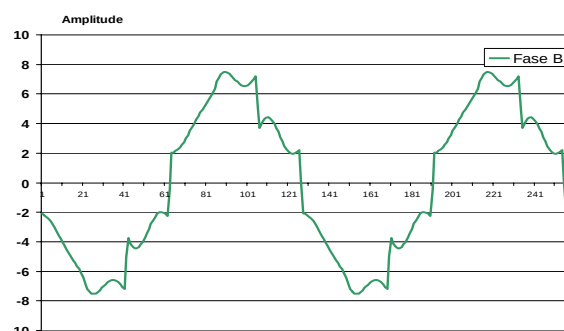
As correntes de linha no alimentador, fornecidas pelas figuras 4.21 mostram os resultados experimentais e computacionais.



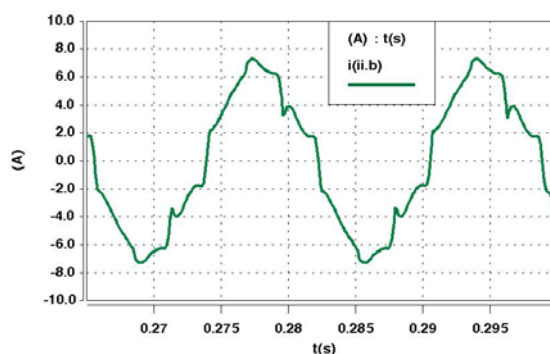
Linha A - alimentador - experimental



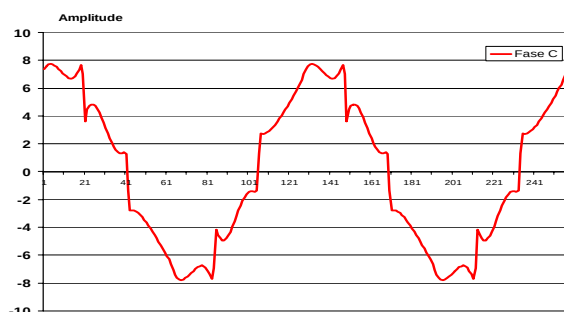
Linha A - alimentador - computacional



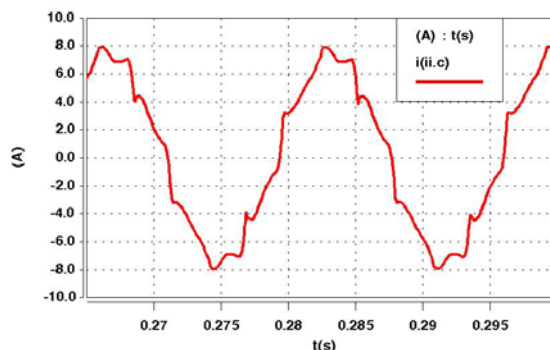
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



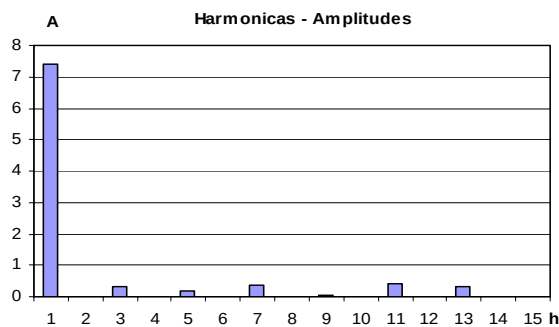
Linha C - alimentador - experimental



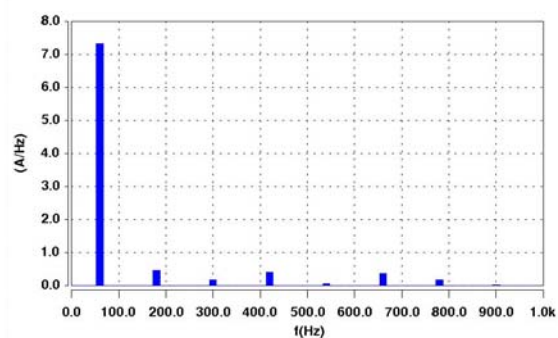
Linha C - alimentador - computacional

*Figura 4.21 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional
- suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa*

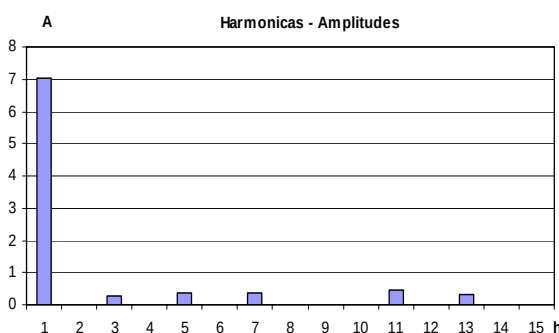
Complementarmente, a figura 4.22 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico no alimentador, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



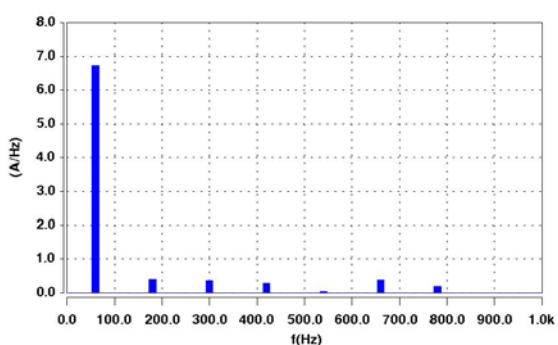
Linha A - alimentador - experimental



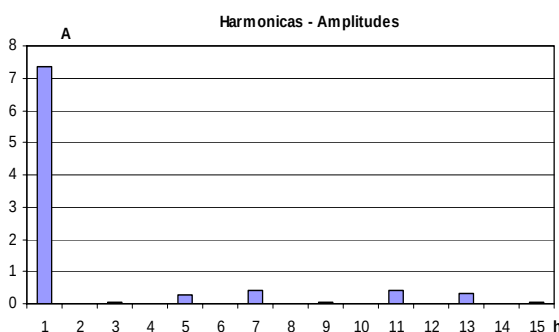
Linha A - alimentador - computacional



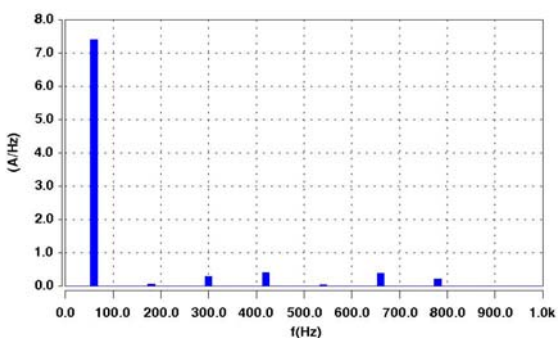
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

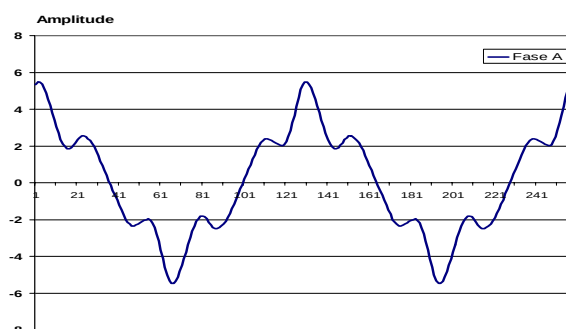


Linha C - alimentador - computacional

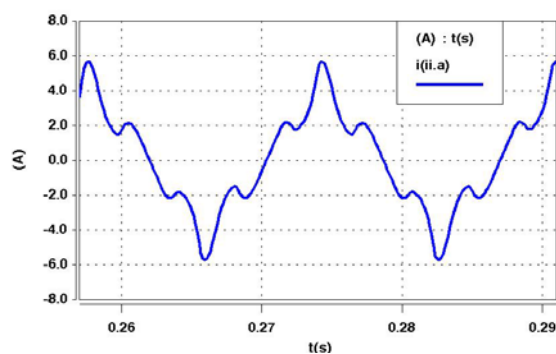
Figura 4.22 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência positiva e negativa

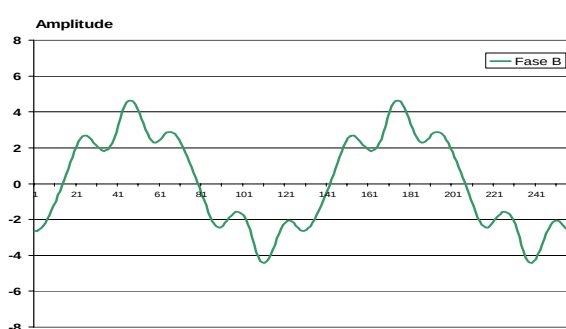
Por fim, a figura 4.23 é indicativa das correntes de linha A, B e C no filtro eletromagnético. Objetivando, mais uma vez, o estabelecimento de termos comparativos, ambos os resultados, experimental e computacional, são evidenciados.



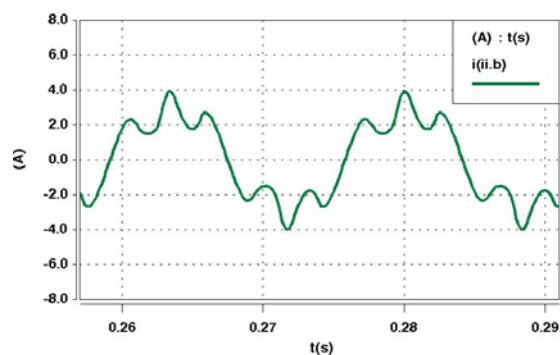
Linha A - filtro - experimental



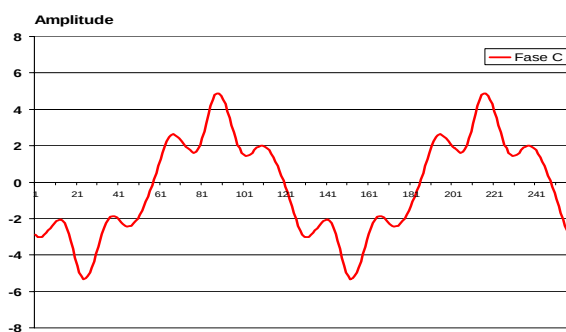
Linha A - filtro - computacional



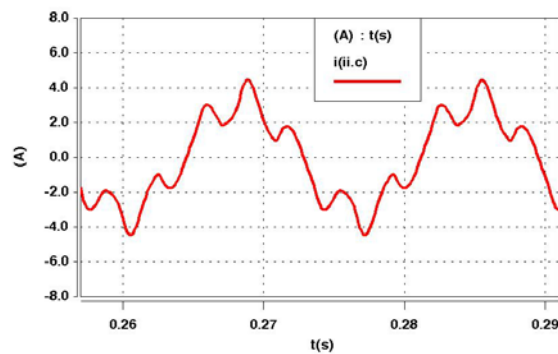
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



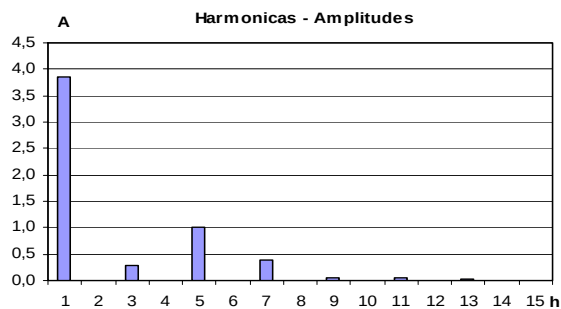
Linha C - filtro - experimental



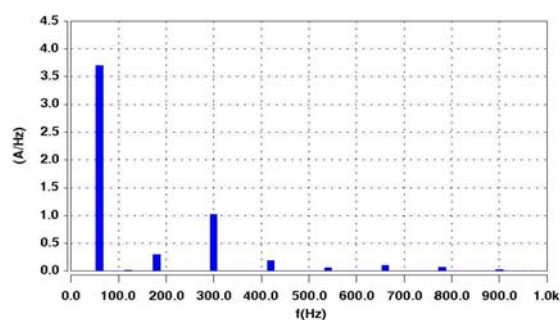
Linha C - filtro - computacional

Figura 4.23 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa

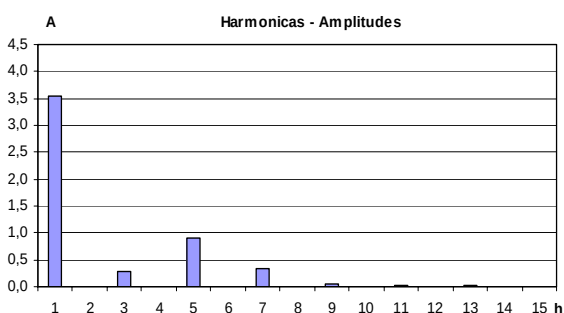
Ainda, a figura 4.24 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



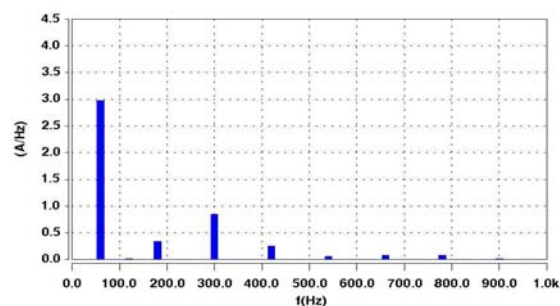
Linha A - filtro - experimental



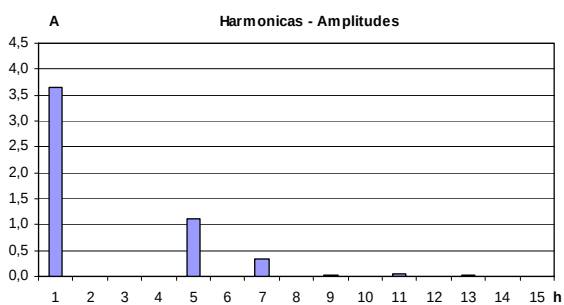
Linha A - filtro - computacional



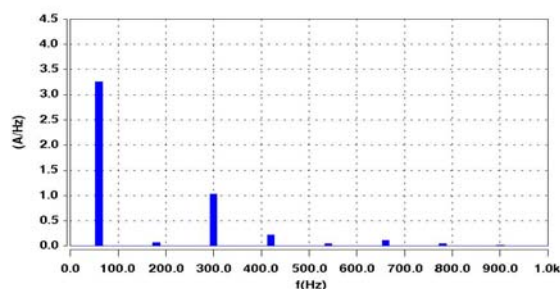
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

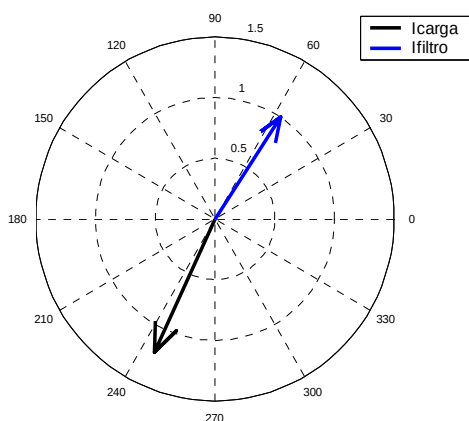


Linha C - filtro - computacional

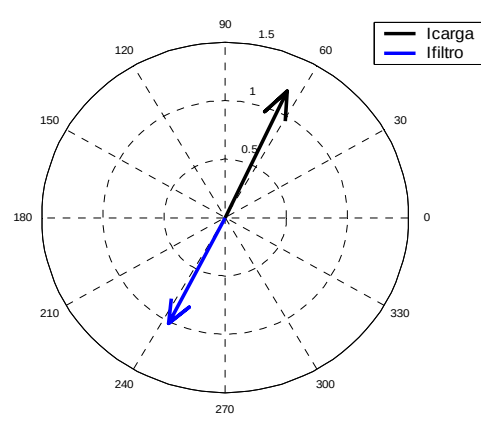
*Figura 4.24 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional -
- suprimento de tensão ideal - filtro de seqüência positiva e negativa*

(d) Síntese dos resultados

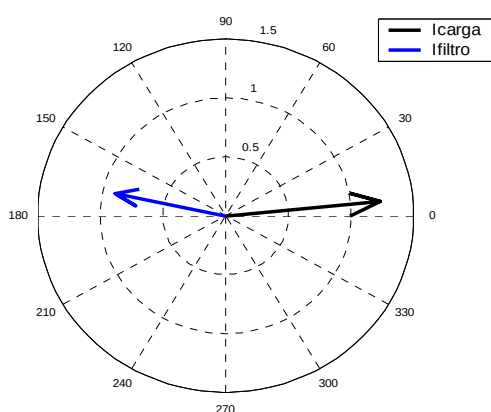
Objetivando fornecer maiores esclarecimentos sobre a operacionalidade do filtro as figuras 4.25 e 4.26 apresentam, na forma de diagramas fasoriais, as correntes harmônicas de pico de 5ª e 7ª ordem, correspondentes ao filtro e à carga não-linear, para as três fases monitoradas. As análises compreendem os resultados computacionais e experimentais.



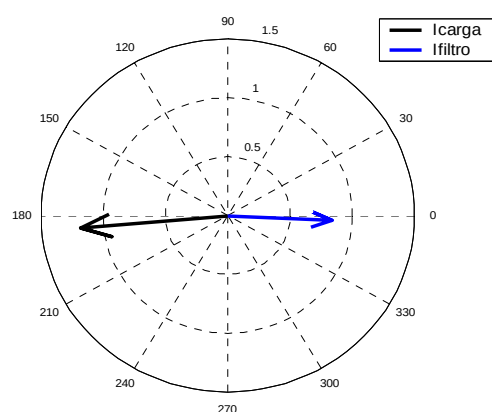
Linha A - experimental - 5ª ordem



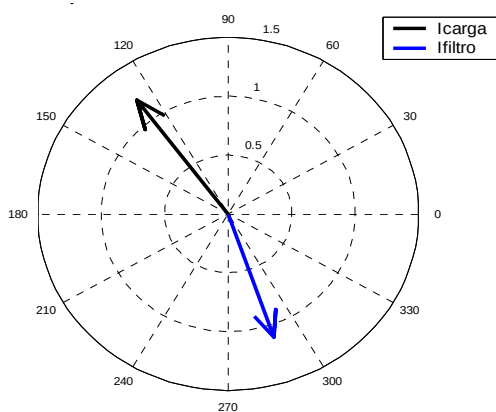
Linha A - computacional - 5ª ordem



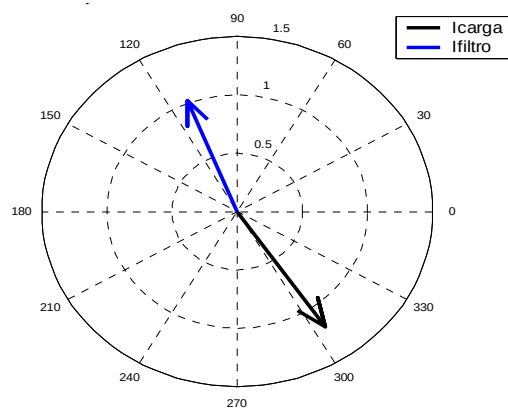
Linha B - experimental - 5ª ordem



Linha B - computacional - 5ª ordem



Linha C - experimental - 5ª ordem

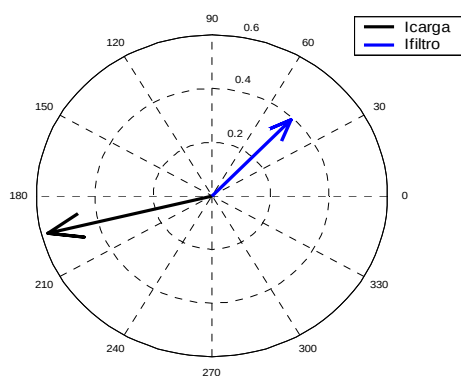


Linha C - computacional - 5ª ordem

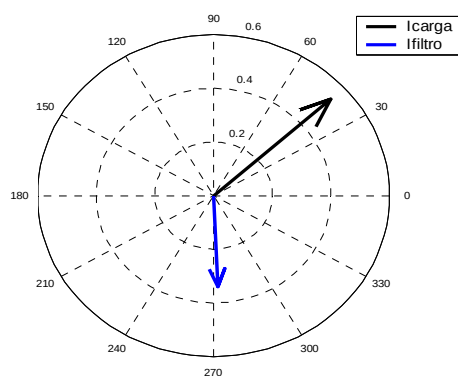
Figura 4.25 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 5ª ordem - filtro de seqüência positiva e negativa

É importante observar que as referências para os fasores das correntes de carga e do filtro, obtidos de forma computacional e experimental, não são iguais. Não obstante a este fato, a compensação das ordens harmônicas fica clara quando se observam as magnitudes e as

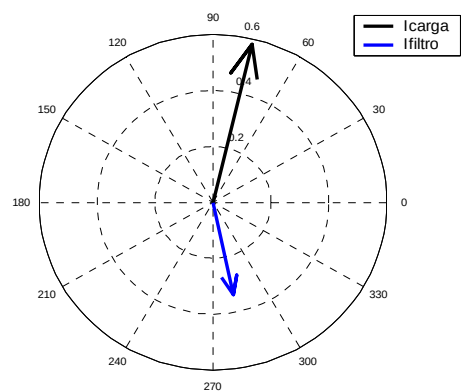
diferenças entre os fasores apresentados para um mesmo procedimento (experimental ou computacional).



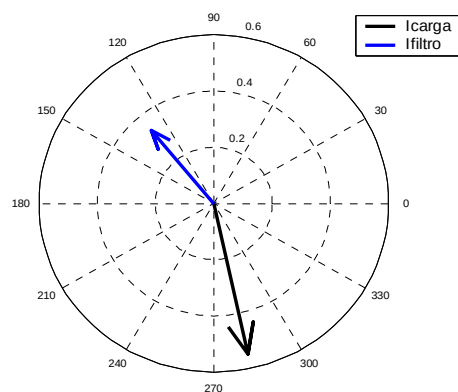
Linha A - experimental - 7ª ordem



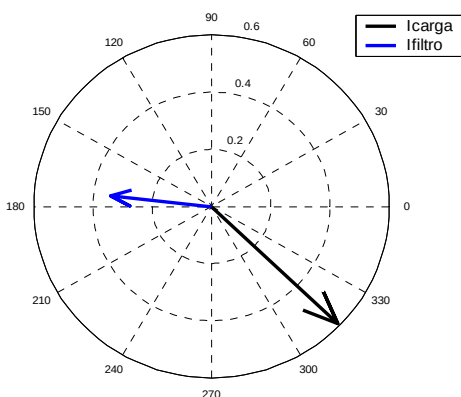
Linha A - computacional - 7ª ordem



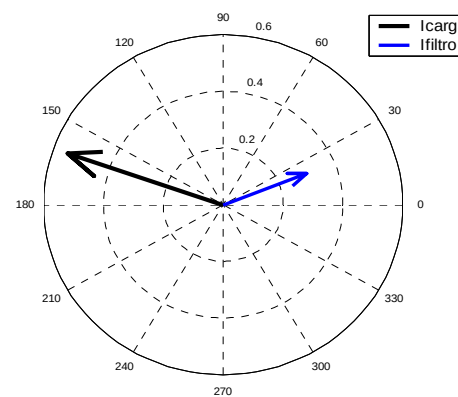
Linha B - experimental - 7ª ordem



Linha B - computacional - 7ª ordem



Linha C - experimental - 7ª ordem



Linha C - computacional - 7ª ordem

Figura 4.26 - Diagramas fasoriais das correntes de linha na carga e no filtro - experimental e computacional - suprimento de tensão ideal - 7ª ordem - filtro de sequência positiva e negativa

4.3.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 4.8 resume os principais resultados anteriores e permite constatar a eficácia do dispositivo e a validação da modelagem do filtro de sequência positiva e negativa.

Tabela 4.8 - Síntese comparativa dos resultados da operação do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa sob condições ideais de suprimento

Local	Grandeza		Simulação			Experimental			Diferença (%)		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
Corrente na carga não-linear	Valor eficaz (A)		3,89	3,9	3,89	3,89	4,01	3,9	0	2,7	0,2
	Harmônicas mais significativas pico (A)	5 ^a	1,2	1,19	1,2	1,22	1,24	1,21	1,6	4,0	0,8
		7 ^a	0,54	0,55	0,55	0,58	0,61	0,59	6,9	9,8	6,7
	DIHT (%)		26,6	26,5	26,6	28,9	28,9	28,9	7,9	8,3	7,9
Corrente no alimentador	Valor eficaz (A)		5,22	4,79	5,26	5,26	5,03	5,24	0,7	4,7	0,4
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	0,32	0,28	0,05	0,3	0,26	0,04	6,6	7,7	25
		5 ^a	0,18	0,37	0,29	0,2	0,37	0,29	10	0	0
		7 ^a	0,4	0,3	0,4	0,36	0,32	0,4	11,1	6,6	0
	DIHT (%)		10,4	11,3	10,6	11,3	12,8	11,6	7,9	2,6	8,6
Corrente no filtro de sequência positiva e negativa	Valor Eficaz (A)		2,75	2,42	2,52	2,8	2,6	2,7	1,8	6,9	6,6
	Harmônicas mais significativas pico (A)	3 ^a	0,3	0,32	0,03	0,28	0,29	0,01	7,1	10,3	-
		5 ^a	1,02	0,84	1,03	1,0	0,9	1,11	1,9	6,6	7,2
		7 ^a	0,34	0,34	0,3	0,37	0,34	0,34	8,1	0	11,7
	DIHT (%)		30,5	31,3	32,7	29,2	29,7	32,1	4,4	5,4	1,8

Observando os resultados da tabela 4.8, pode-se constatar que:

- As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear se apresentam com conteúdos harmônicos responsáveis por distorções totais em torno de 28%;
- Quando da inserção do filtro de sequência positiva e negativa, a nova distorção total da corrente de linha, do lado do supridor, passou para um valor nas imediações de 10%. Tal redução, bastante significativa, tem sustentação na forte eliminação da componente harmônica de ordem 5 e parte da componente de ordem 7. Disto desprende que ocorreu uma redução da distorção harmônica total de cerca de 65%;
- No que tange às correntes encontradas nas linhas do filtro, constatou-se, como seria esperado, que o dispositivo, operando de forma saturada e com neutro isolado, se apresenta como uma carga não-linear com geração de harmônicas de sequência positiva e negativa, sendo a 5ª e 7ª ordens as que se manifestam com maiores amplitudes. O aparecimento da 3ª ordem se justifica pela geometria planar do reator, como já mencionado anteriormente;
- Os resultados computacionais e experimentais, de um modo geral, evidenciaram uma boa correlação. Isto ocorreu tanto para as formas de onda quanto para os valores obtidos. Desta forma, fica esclarecido que o processo de validação da modelagem computacional apresentou um bom desempenho no sentido de representar a operação do dispositivo focado nesta fase da pesquisa, qual seja, o filtro de sequência positiva e negativa;
- Como observação final, é importante ressaltar que, muito embora se tenha constatado o bom desempenho do filtro de sequência positiva e negativa, outras influências operacionais não podem ser ignoradas. Dentre elas destaca-se o aumento do valor RMS da corrente de suprimento do conjunto carga e filtro, visto a parcela de corrente fundamental necessária ao funcionamento da unidade eletromagnética. Associada a mesma corrente, há ainda a ser destacado as implicações sobre o fator

de potência do conjunto, o qual sofre redução diante do aumento da parcela indutiva da corrente total. Com o aumento da corrente fundamental e sua influência sobre os cálculos dos DIHT, vale também observar que, somado ao efetivo processo de atenuação das componentes harmônicas, isto também contribui para uma redução maior dos níveis de distorção.

Deve-se ressaltar que, embora os resultados computacionais e experimentais apresentem boa concordância, é de se esperar, como aconteceram para a metodologia da seção anterior, alguns desvios entre os resultados. Os motivos que justificariam tais discrepâncias já foram considerados anteriormente e não serão aqui repetidos.

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo primou pelos seguintes aspectos:

- Caracterização física dos protótipos dos filtros eletromagnéticos de sequência zero e de sequência positiva e negativa, construídos para fins deste trabalho e respectivas obtenções dos dados necessários ao suprimento das informações para os modelos computacionais elaborados;
- Definição dos arranjos laboratoriais utilizados tanto para os estudos computacionais como os experimentais, voltados para o processo de validação das modelagens dos filtros eletromagnéticos sob enfoque;
- Apresentação e discussão dos resultados experimentais e computacionais para as correntes de linha e respectivos espectros harmônicos correspondentes à carga não-linear, à alimentação e aos filtros eletromagnéticos, objetivando o processo de

validação dos modelos e estratégias de compensação de correntes harmônicas aqui propostas;

- Análise da eficácia dos filtros de sequência zero e de sequência positiva e negativa quanto aos seus propósitos.

Atendendo aos objetivos supramencionados, o presente capítulo ofereceu as seguintes contribuições:

- Validação do modelo computacional do filtro eletromagnético de sequência zero, sob condições operacionais consideradas ideais, ou seja: fonte de tensão senoidal equilibrada, carga não-linear equilibrada, parâmetros de rede equilibrados e filtro adequado aos propósitos da compensação (baixa impedância à sequência zero). Os estudos computacionais comparados aos respectivos resultados laboratoriais constituíram-se na base do processo utilizado;
- Validação do modelo computacional do filtro eletromagnético de sequência positiva e negativa, sob condições operacionais também consideradas ideais, caracterizadas no item anterior. Os estudos computacionais comparados aos respectivos resultados laboratoriais constituíram-se na base do processo utilizado;
- Ratificação da eficácia das metodologias propostas para o processo de filtragem, fundamentadas em dispositivos eletromagnéticos.

FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS FILTROS ELETROMAGNÉTICOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos capítulos precedentes foram abordados aspectos diversos referentes aos equipamentos em estudo. As análises envolveram desde o princípio de funcionamento dos dispositivos até a validação computacional, através de ensaios laboratoriais. Não obstante o sucesso até então obtido, é relevante ressaltar que as investigações conduzidas contemplaram tão apenas situações ideais de funcionamento. Sob tais condições, devem ser compreendidas: redes de alimentação com tensões senoidais e equilibradas, impedâncias simétricas para todas as partes envolvidas, carga não-linear equilibrada, etc.

Em vista do fato de que as redes elétricas não atendem as premissas anteriores, torna-se imperativo a realização de trabalhos adicionais investigativos voltados para os estudos de desempenho dos produtos focados sob distintas condições que aquelas postuladas. Este assunto constitui-se na essência deste capítulo, o qual realiza estudos comparativos dos filtros, de modo experimental e computacional, quando estes se encontram operando sob condições não-ideais de funcionamento.

Para atender aos objetivos aqui propostos, este capítulo encontra-se estruturado da seguinte forma:

Definição dos casos considerados nas investigações experimentais e computacionais, os quais contemplam os desvios das condições ideais mais comumente encontrados nas redes e equipamentos elétricos;

Apresentação dos resultados obtidos e respectivas comparações com as situações idealizadas;

Caracterização do nível de relevância do tipo de desvio analisado.

5.2 - FATORES DE INFLUÊNCIA NOS PROCESSOS DE FILTRAGEM

Assim, para contemplar os itens anteriormente mencionados, a tabela 5.1 sintetiza as situações selecionadas para os estudos de desempenho dos filtros eletromagnéticos sob distintos desvios das condições ideais. Para cada caso considerado, são caracterizadas as situações e os valores adotados para quantificar os desvios. Estas situações expressam condições operacionais reais, frequentemente encontradas nos sistemas elétricos. Em vista dos impactos que as mencionadas variáveis possam trazer para a operação dos dispositivos, considera-se fundamental avaliar seus efeitos para um correto dimensionamento do filtro eletromagnético.

Vale lembrar que, à exceção dos parâmetros alterados e destacados na tabela 5.1, os demais dados obedecem integralmente àqueles já empregados no capítulo anterior. Por tais motivos, considera-se dispensável repeti-los nesta etapa do trabalho.

Ainda com respeito aos casos identificados para os estudos, apenas o Caso a-4 não possui correspondência experimental. Isto se deve ao fato que o protótipo construído não permite mudanças para a impedância de dispersão do filtro.