

Tabela 5.1 - Casos analisados para as situações operacionais não-ideais

Filtro eletro magnético	Caso	Situação	Características	Tipo de estudo
Seqüência zero	a-1	Tensão senoidal desequilibrada ($V_A^-/V_A^+ = 3\%$) e carga não-linear equilibrada (2,7 kVA)	$V_A^0 = 1,35V / 162^\circ$ $V_A^+ = 126,5V / 0^\circ$ $V_A^- = 3,85V / -6,4^\circ$	Computacional / experimental
	a-2	Tensão distorcida equilibrada (DTHT=7,1% e $V_1=127V$) e carga não-linear equilibrada (2,7 kVA)	$V_3^0 = 5\%$, $V_5^- = 4\%$, $V_7^+ = 3\%$	Computacional / experimental
	a-3	Carga não-linear desequilibrada e tensão senoidal equilibrada de 127 V	$S_A=908VA$, $S_B=633VA$, $S_C=441VA$	Computacional / experimental
	a-4	Carga não-linear e tensão equilibradas, com incremento na indutância de dispersão	Incrementado em 15 vezes	Computacional
Seqüência positiva e negativa	b-1	Tensão senoidal desequilibrada ($V_A^-/V_A^+ = 3\%$) e carga não-linear equilibrada (1,4 kVA)	$V_A^0 = 3,61V / -106^\circ$ $V_A^+ = 120V / 0^\circ$ $V_A^- = 3,61V / 106^\circ$	Computacional / experimental
	b-2	Tensão de alimentação equilibrada com valor eficaz inferior ao nominal e carga equilibrada (1,4 kVA)	$V_A=110V / 0^\circ$, $V_B=110V / -120^\circ$, $V_C=110V / 120^\circ$	Computacional / experimental
	b-3	Carga não-linear desequilibrada e tensão senoidal equilibrada de 117 V	$S_A=370VA$, $S_B=470VA$, $S_C=580VA$	Computacional / experimental
	b-4	Exclusão dos resistores defasadores e tensão equilibrada	$R_A=0 \Omega$, $R_B=0 \Omega$, $R_C=0 \Omega$	Computacional / experimental

5.2.1 - RESULTADOS PARA O FILTRO DE SEQÜÊNCIA ZERO

Com o intuito de avaliar o desempenho do filtro de seqüência zero a partir das situações enfocadas na tabela 5.1, o mesmo arranjo físico identificado na figura 4.4, e repetido na forma da figura 5.1, é utilizado para os trabalhos subseqüentes.

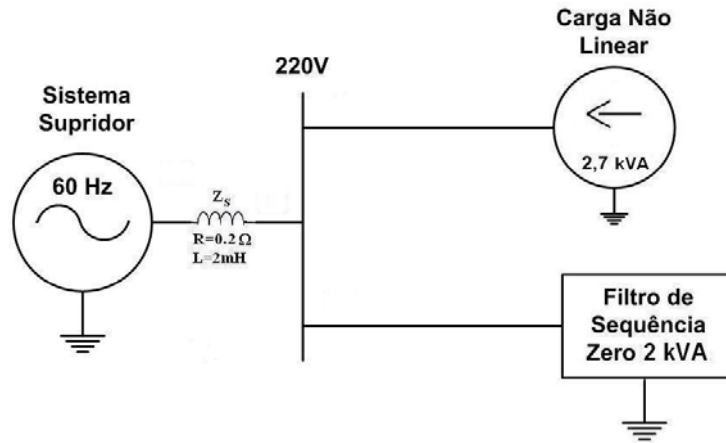


Figura 5.1 - Arranjo físico utilizado para os estudos computacionais e experimentais - filtro de seqüência zero

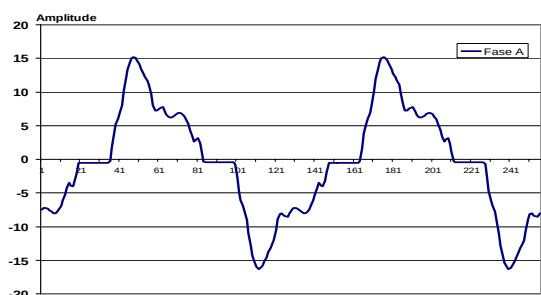
Caso a-1 - Alimentação com tensão desequilibrada

Como forma de analisar o desempenho do filtro diante de tensões desequilibradas, adotou-se uma assimetria responsável por um fator de desequilíbrio de 3% (V_A^-/V_A^+), mantendo-se as demais características idênticas às condições ideais de funcionamento. Vale ainda ressaltar que a tensão utilizada, além da componente de seqüência negativa responsável pelo indicador acima, ainda possui uma componente de seqüência zero (V_A^0) de 1,35V.

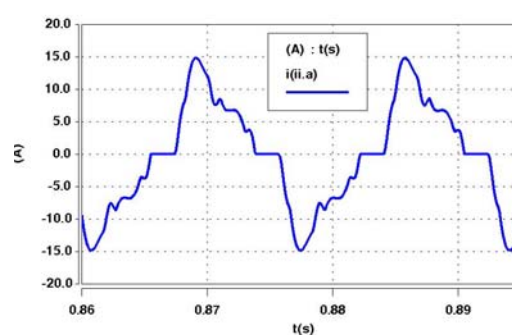
Os resultados a seguir apresentam as correntes de linha na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro eletromagnético de seqüência zero.

(a) Corrente na carga não-linear

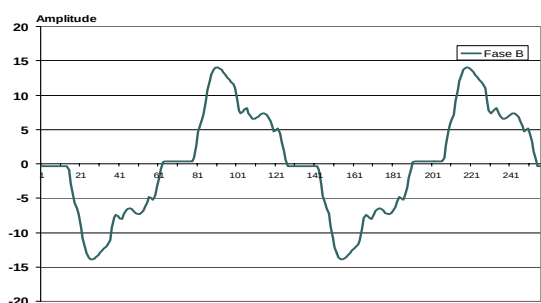
A figura 5.2 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C registradas na carga não-linear, de forma experimental e computacional.



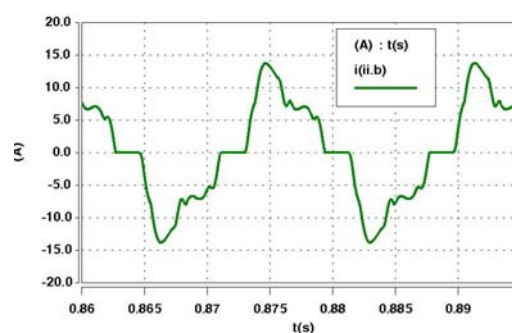
Linha A - carga não-linear - experimental



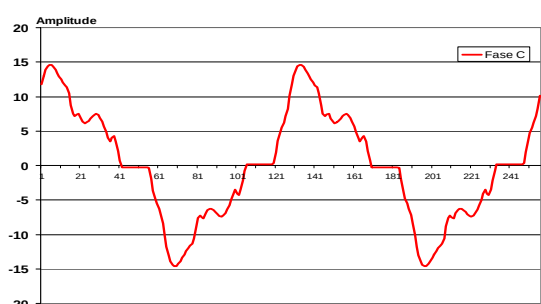
Linha A - carga não-linear - computacional



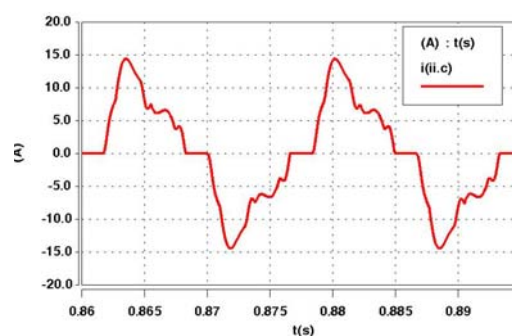
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



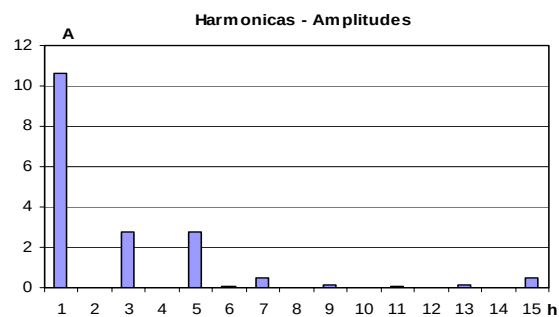
Linha C - carga não-linear - experimental



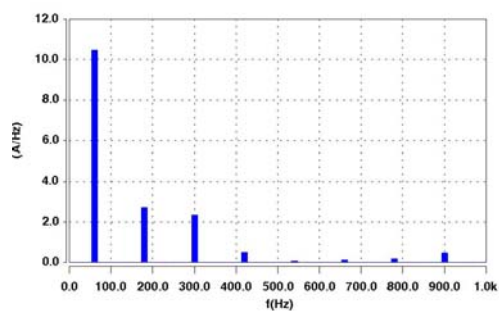
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.2 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

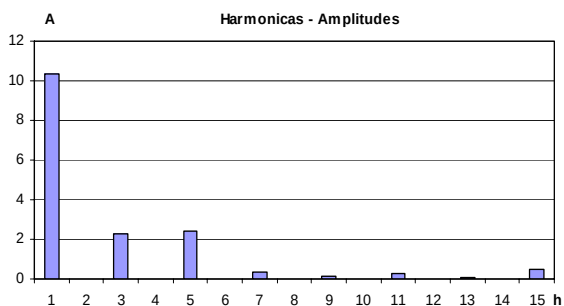
Complementarmente, a figura 5.3 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico da figura 5.2.



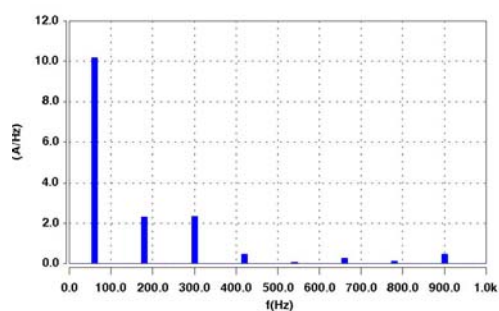
Linha A - carga não-linear - experimental



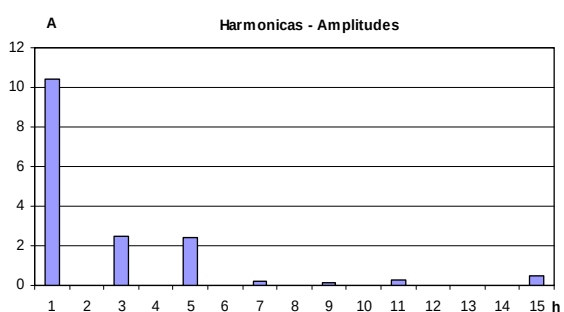
Linha A - carga não-linear - computacional



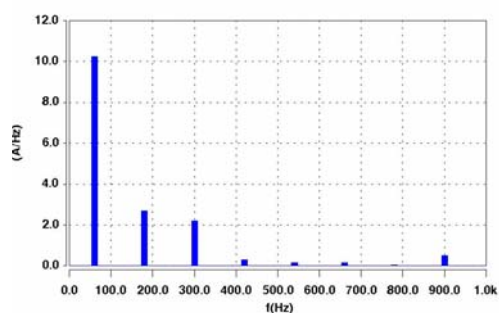
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

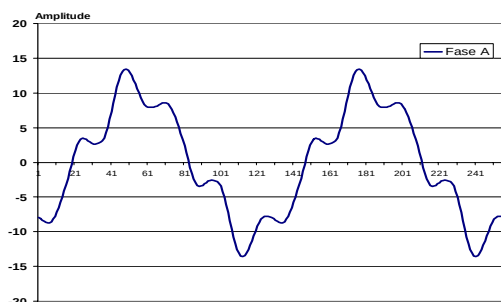


Linha C - carga não-linear - computacional

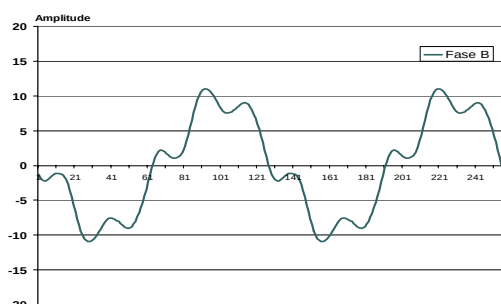
Figura 5.3 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

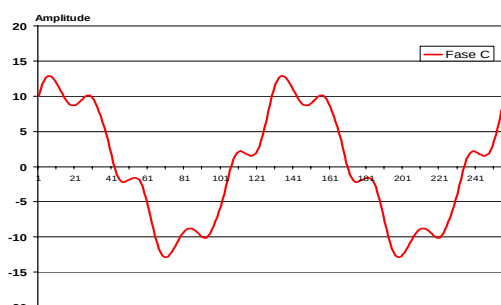
A figura 5.4 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, focando os resultados experimental e computacional.



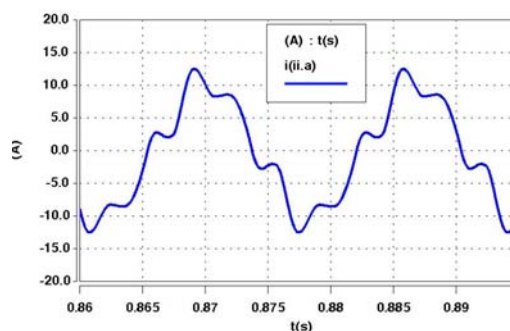
Linha A - alimentador - experimental



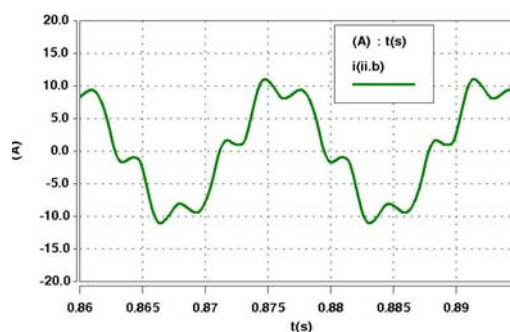
Linha B - alimentador - experimental



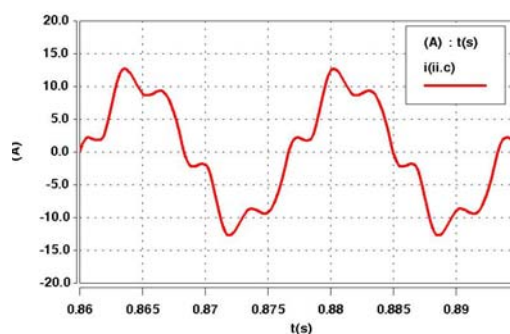
Linha C - alimentador - experimental



Linha A - alimentador - computacional



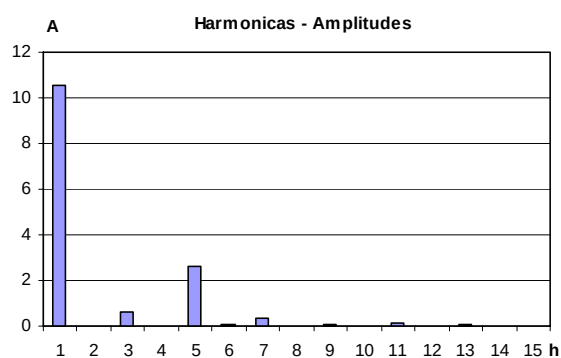
Linha B - alimentador - computacional



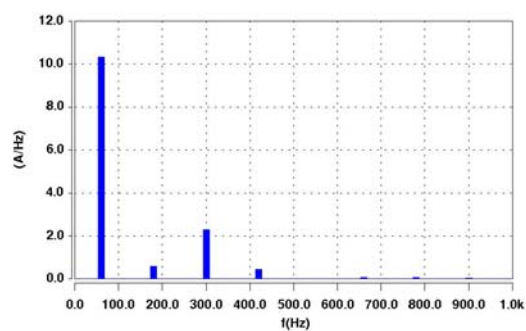
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.4 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

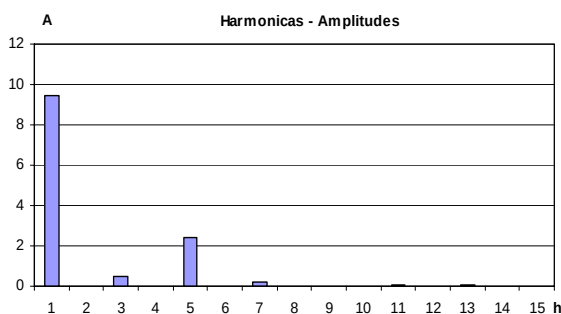
De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.5 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



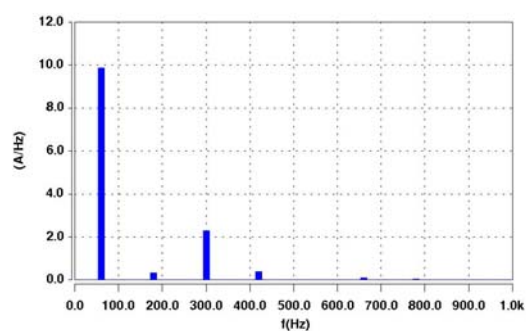
Linha A - alimentador - experimental



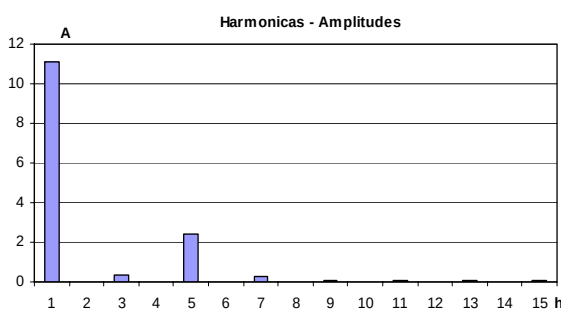
Linha A - alimentador - computacional



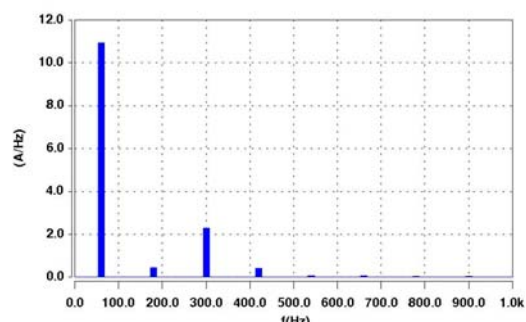
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

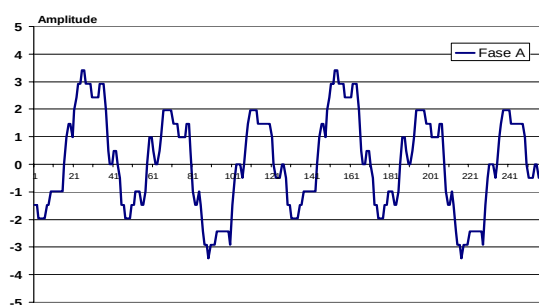


Linha C - alimentador - computacional

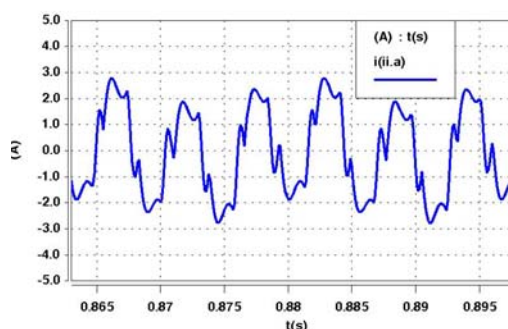
Figura 5.5 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

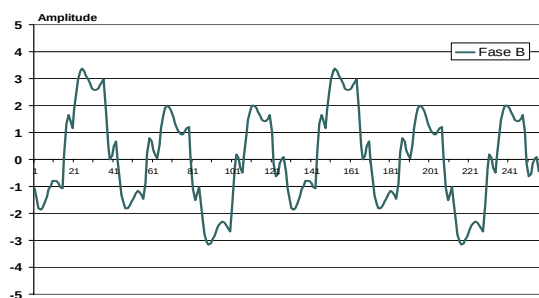
Por fim, a figura 5.6 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético. Novamente, os resultados experimentais e computacionais são mostrados.



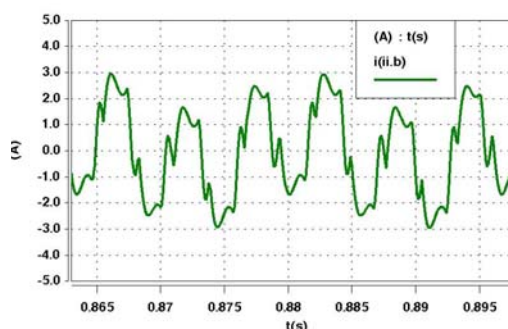
Linha A - filtro - experimental



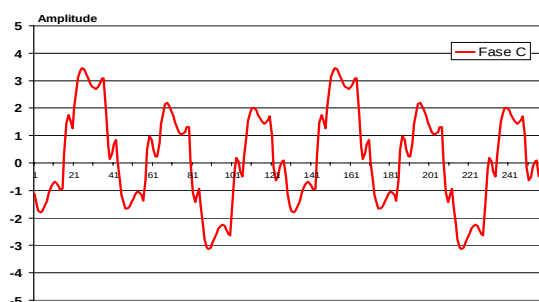
Linha A - filtro - computacional



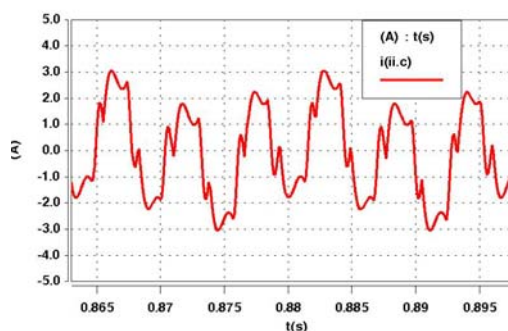
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



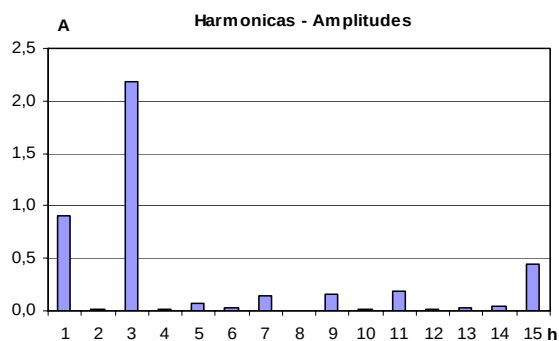
Linha C - filtro - experimental



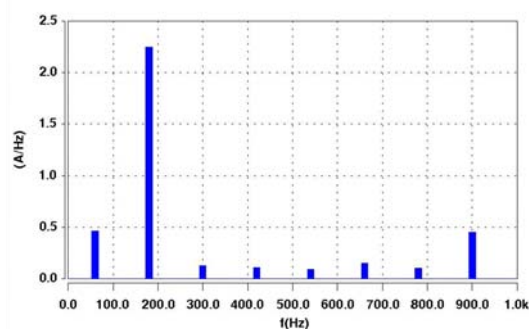
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.6 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

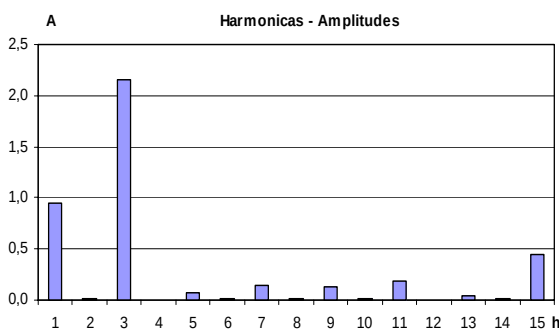
Novamente, a figura 5.7 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



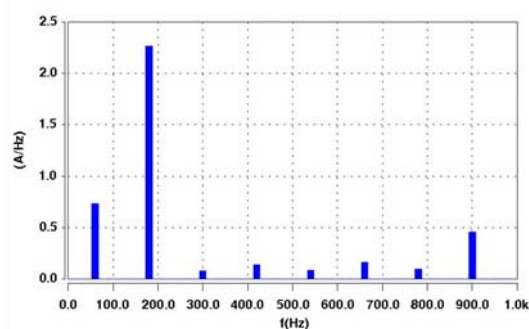
Linha A - filtro - experimental



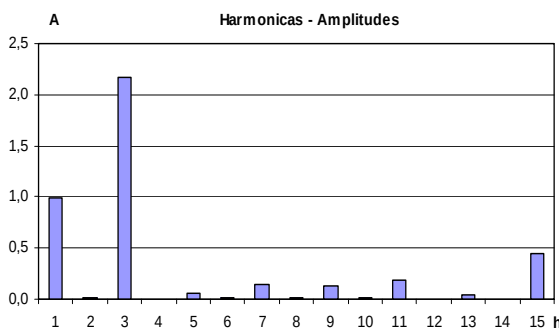
Linha A - filtro - computacional



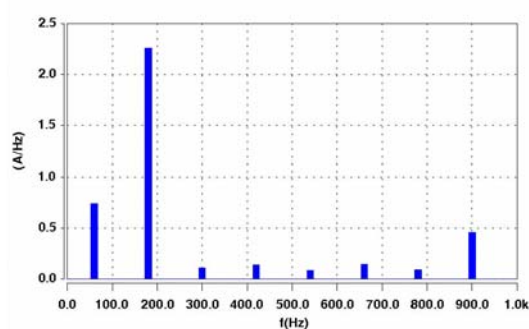
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

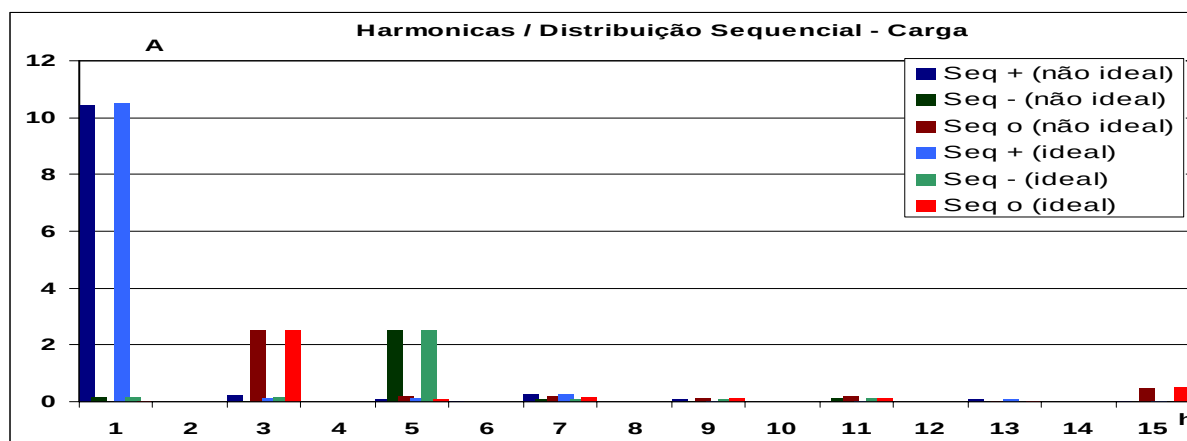


Linha C - filtro - computacional

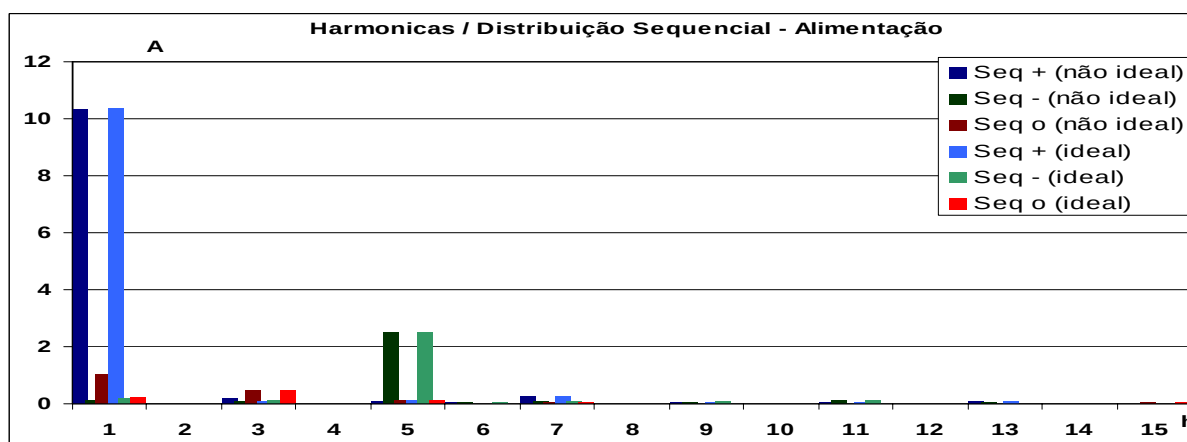
Figura 5.7 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

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

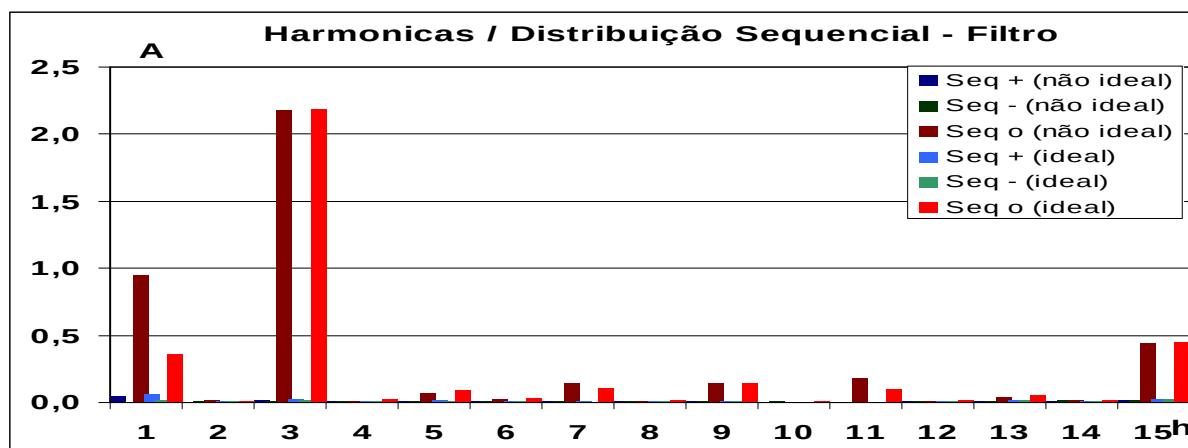
Objetivando comparar o desempenho do filtro de seqüência zero quando com suprimento ideal e sob suprimento desequilibrado, nos termos investigados, a figura 5.8 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente, tal como aconteceu para o caso senoidal, mostrado no capítulo anterior.



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



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



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

Figura 5.8 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão desequilibrada - filtro de seqüência zero

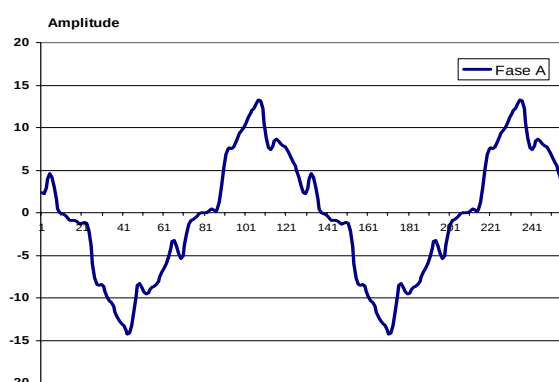
A análise da figura 5.8 enfatiza que o desequilíbrio na tensão de suprimento, como seria esperado, é responsável pela geração de componentes harmônicas de seqüência zero na frequência de 60Hz, que fluem do barramento de suprimento para o filtro. Tomando por base apenas a componente de seqüência zero, esta, somada às componentes harmônicas de seqüência zero advindas da carga não-linear, determinam o aumento do valor da corrente fundamental de seqüência zero absorvida pelo filtro eletromagnético. Este fato determina a necessidade de cuidados especiais quanto ao dimensionamento dos condutores dos enrolamentos do filtro sob análise, que podem aquecer e, conseqüentemente, trazer implicações para o dispositivo, caso esta situação não seja prevista no projeto do equipamento.

Caso a-2 - Alimentação com tensão distorcida

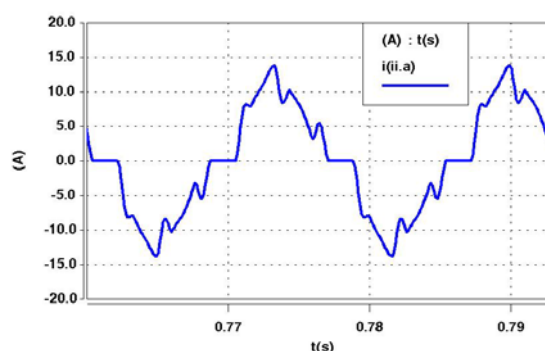
Uma outra condição operacional não-ideal comumente encontrada em sistemas reais está atrelada com um suprimento via um sistema trifásico balanceado, porém distorcido. Para tal fim, como definido anteriormente, adotou-se, a título de ilustração, uma composição tal que a tensão de alimentação contenha: 5% de 3ª harmônica (seqüência zero), 4% de 5ª harmônica (seqüência negativa) e 3% de 7ª harmônica (seqüência positiva).

(a) Corrente na carga não-linear

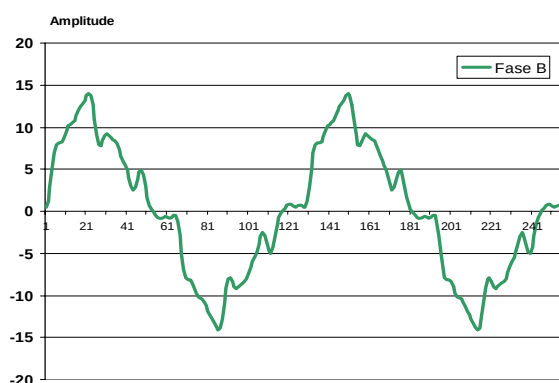
Reportando à carga não-linear, a figura 5.9 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C, de forma experimental e computacional.



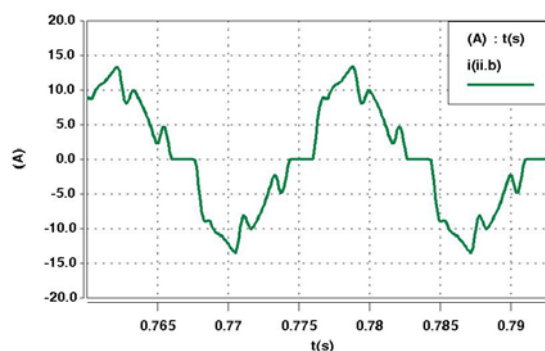
Linha A - carga não-linear - experimental



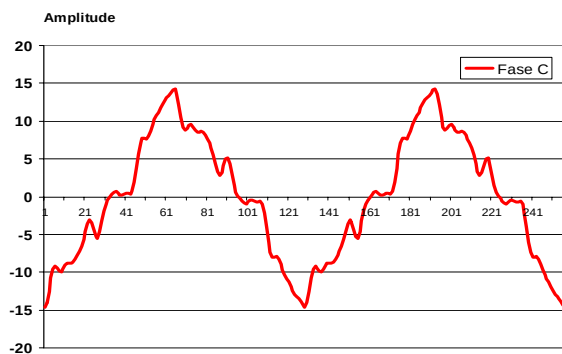
Linha A - carga não-linear - computacional



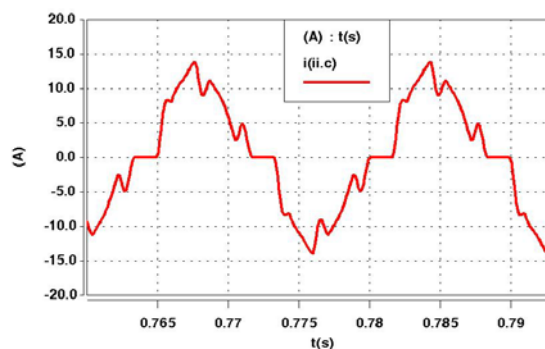
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



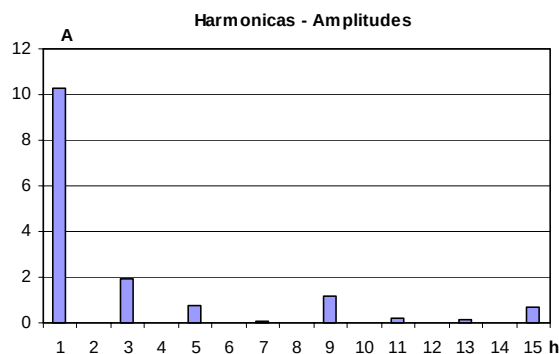
Linha C - carga não-linear - experimental



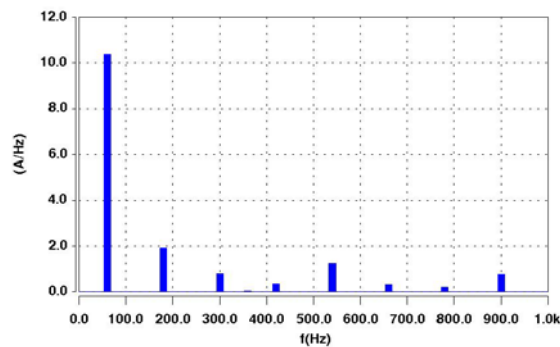
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.9 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

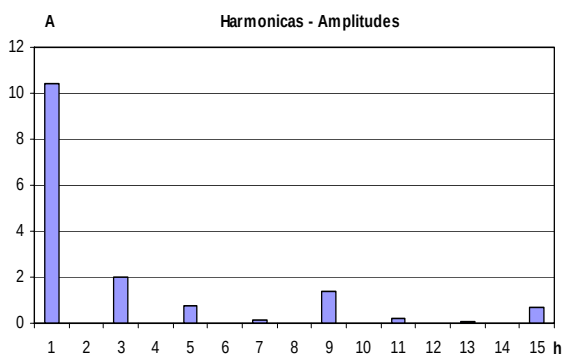
Complementarmente, a figura 5.10 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes de pico anteriores.



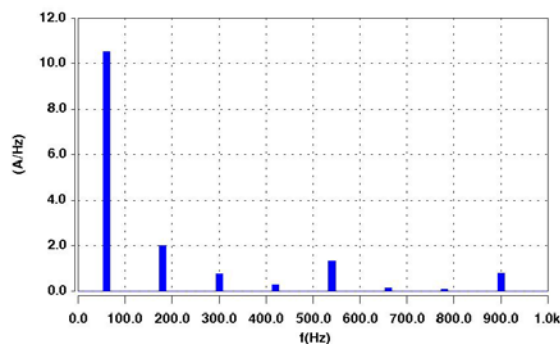
Linha A - carga não-linear - experimental



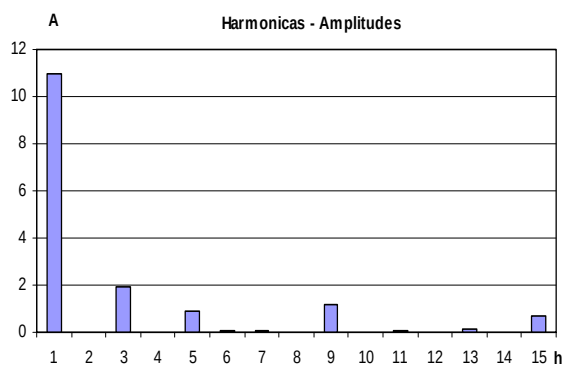
Linha A - carga não-linear - computacional



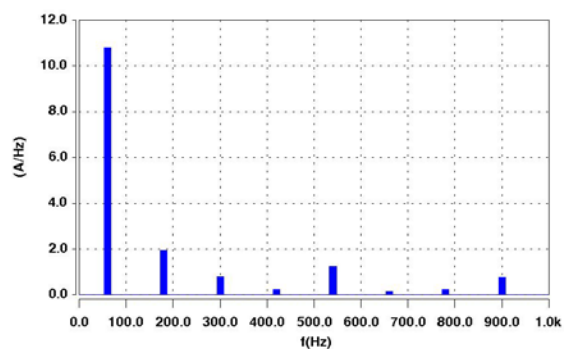
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

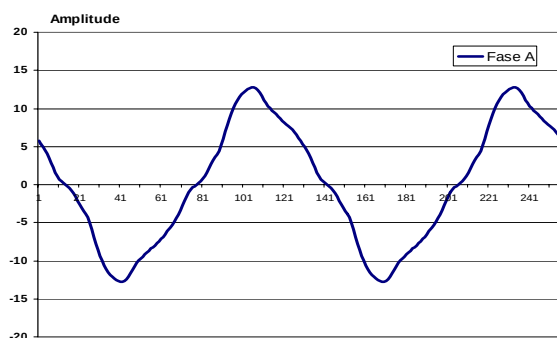


Linha C - carga não-linear - computacional

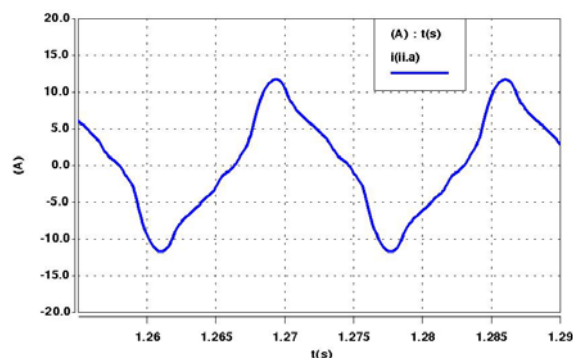
Figura 5.10 - Espectros harmônicos das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha no alimentador

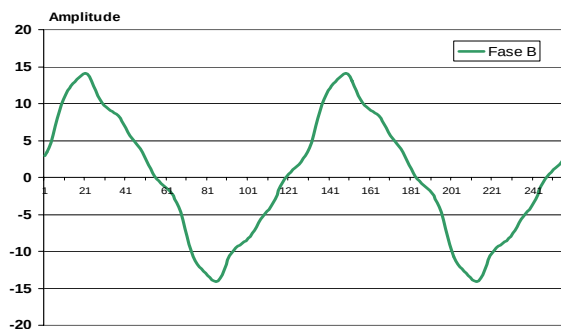
A figura 5.11 apresenta, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, contemplando os resultados experimentais e computacionais.



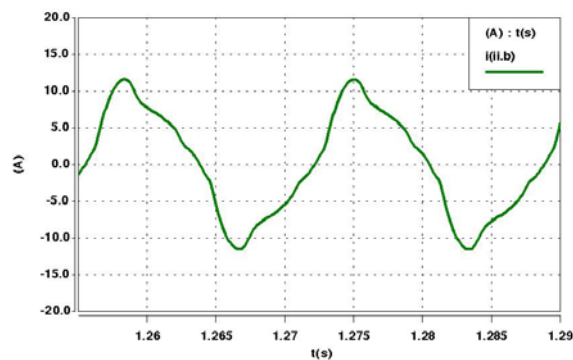
Linha A - alimentador - experimental



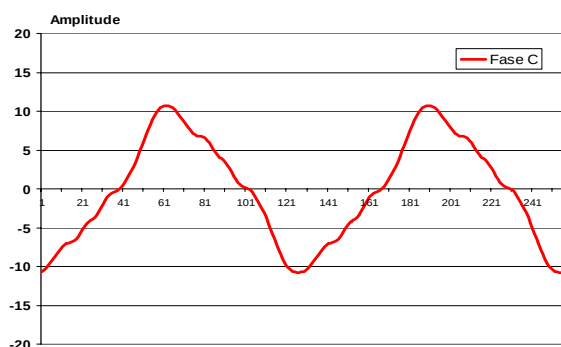
Linha A - alimentador - computacional



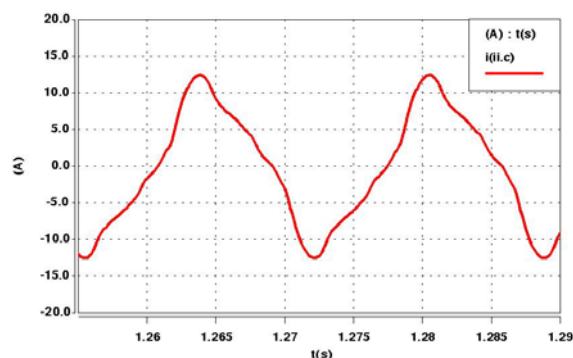
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



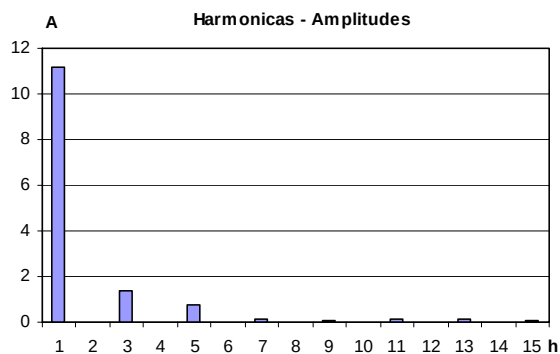
Linha C - alimentador - experimental



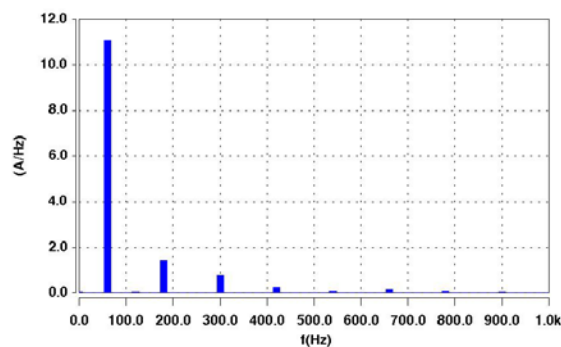
Linha C - alimentador - computacional

**Figura 5.11 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional
- tensão distorcida - filtro de sequência zero**

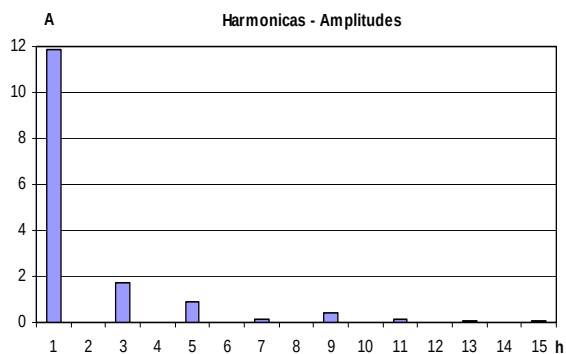
De modo análogo ao caso anterior, a figura 5.12 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico registradas na alimentação, obtidos de forma experimental e computacional, respectivamente.



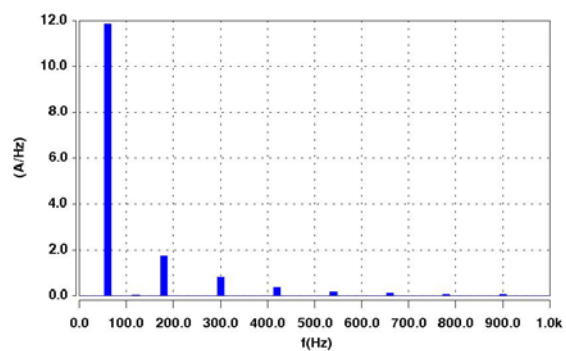
Linha A - alimentador - experimental



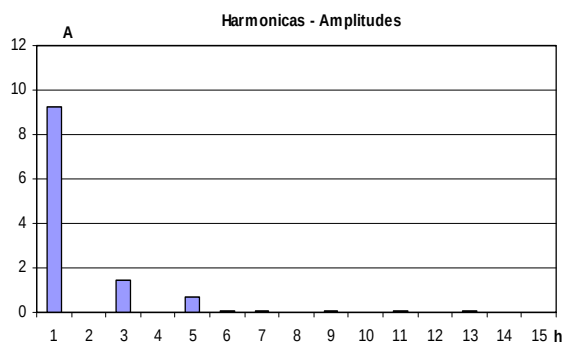
Linha A - alimentador - computacional



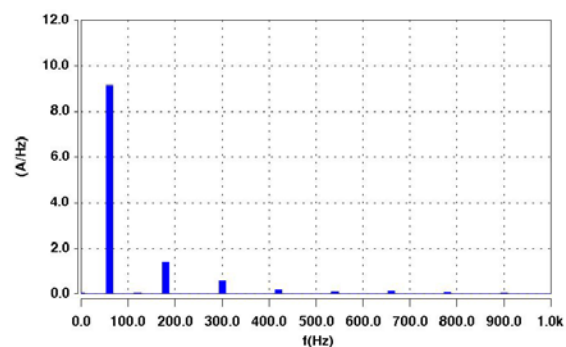
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

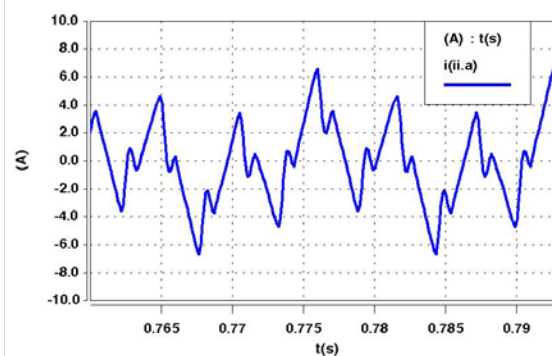
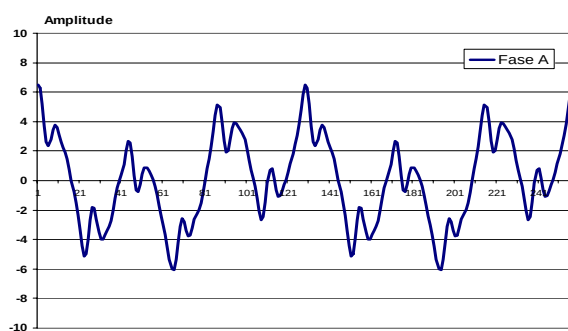


Linha C - alimentador - computacional

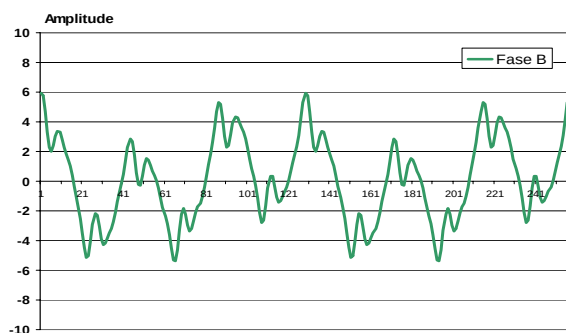
Figura 5.12 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

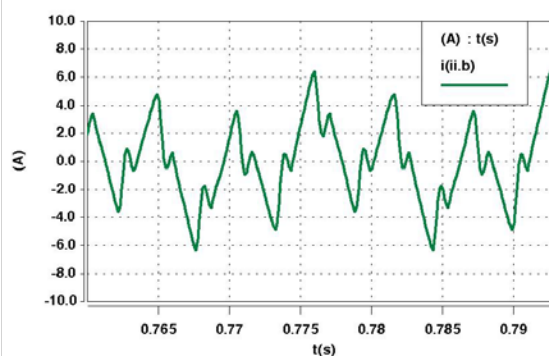
Por fim, a figura 5.13 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético, novamente, de forma experimental e computacional.



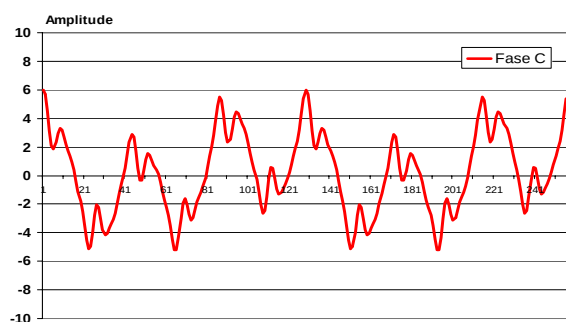
Linha A - filtro - experimental



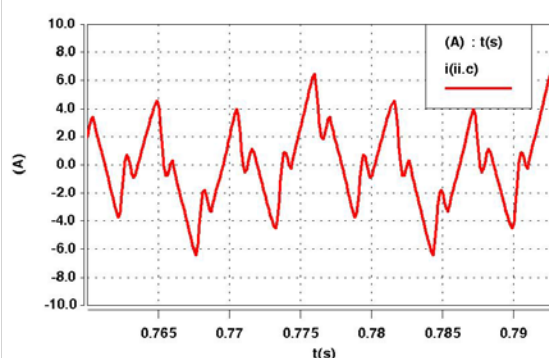
Linha A - filtro - computacional



Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional

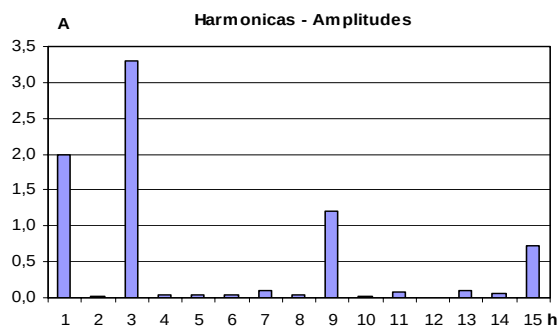


Linha C - filtro - experimental

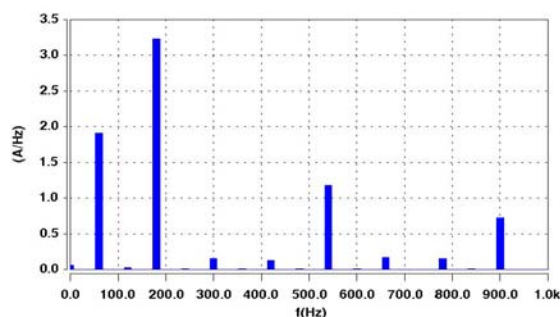
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.13 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de sequência zero

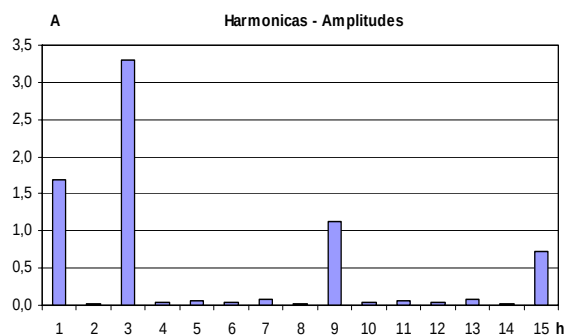
A figura 5.14 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



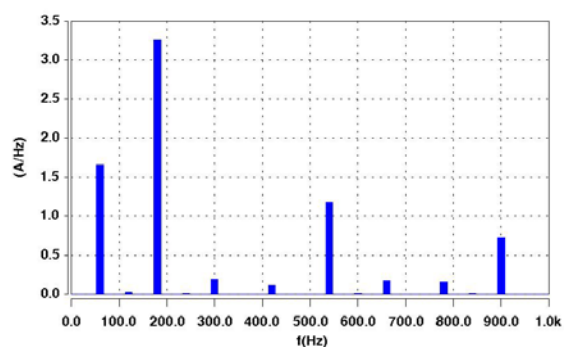
Linha A - filtro - experimental



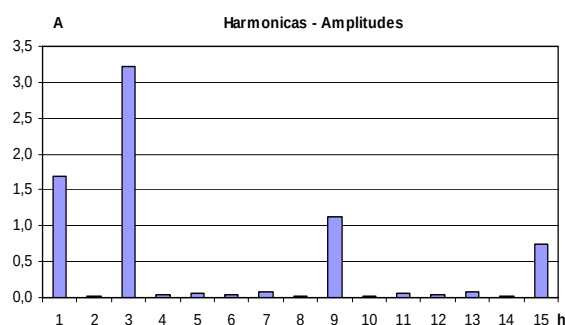
Linha A - filtro - computacional



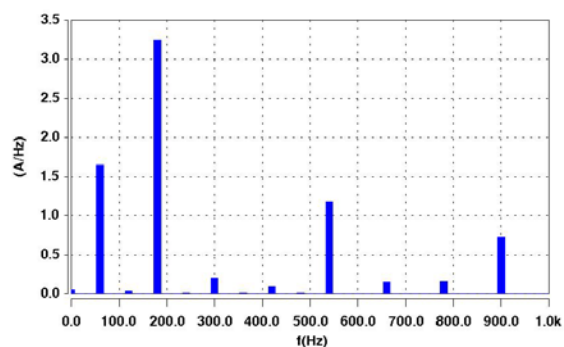
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental



Linha C - filtro - computacional

Figura 5.14 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - tensão distorcida - filtro de seqüência zero

As diferenças encontradas entre os espectros harmônicos das correntes do filtro experimental e computacionalmente podem ser atribuídas, dentre outros aspectos, às imperfeições frequentemente detectadas nos ensaios laboratoriais. De fato, muito embora os esforços para a reprodução de situações impostas, pequenos desvios são inerentes ao processo de geração das ondas de tensão, justificando assim os erros detectados entre os resultados experimentais e computacionais.

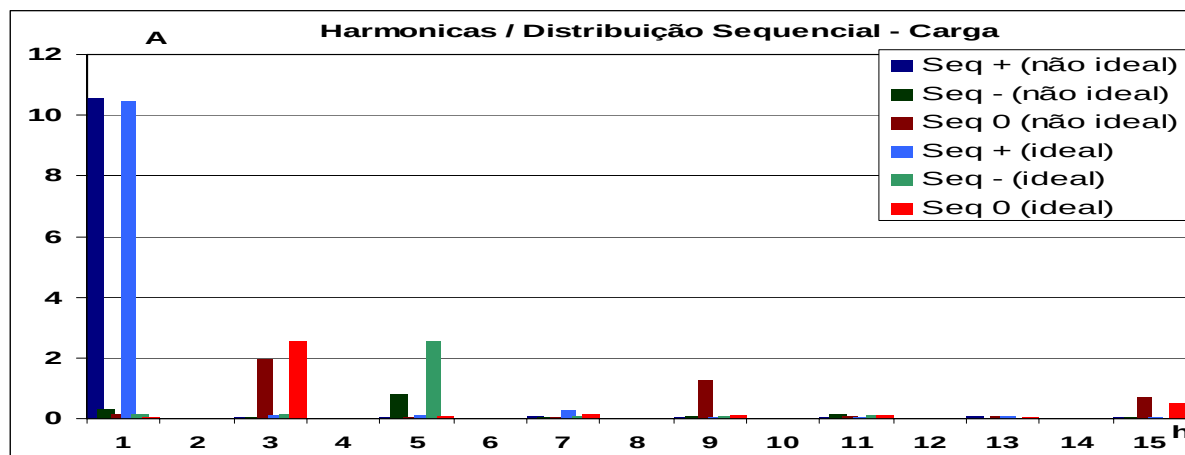
(d) Síntese das correntes de linha de acordo com as suas seqüências de fase

Mais uma vez, objetivando comparar o desempenho do filtro de sequência zero quando do suprimento ideal e diante do suprimento distorcido aqui enfocado, a figura 5.15 apresenta os espectros harmônicos com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero para as correntes de pico nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados e as cores destacam a seqüência de fases da componente harmônica sob foco.

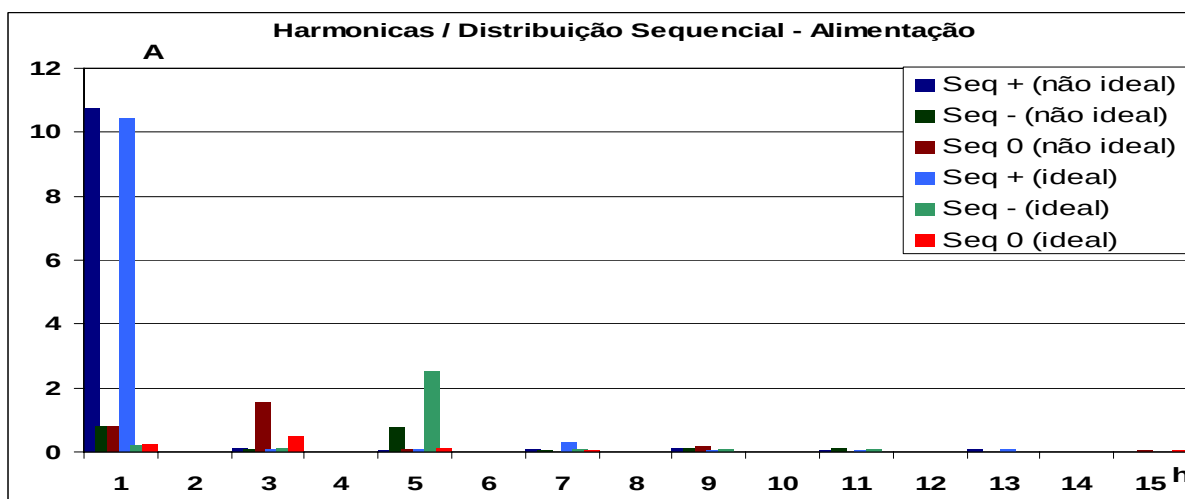
Os resultados para este caso evidenciam que a aplicação de uma tensão distorcida provoca alterações nas correntes de linha da carga, para a freqüência fundamental e para cada ordem harmônica. Este fato, tal como aconteceu para o caso anterior, determina a necessidade de cuidados especiais quanto ao dimensionamento dos condutores dos enrolamentos do filtro sob análise, que podem aquecer e, conseqüentemente, trazer restrições para a utilização do dispositivo, caso esta situação não seja prevista no projeto do equipamento.

Caso a-3 - Carga não-linear desequilibrada

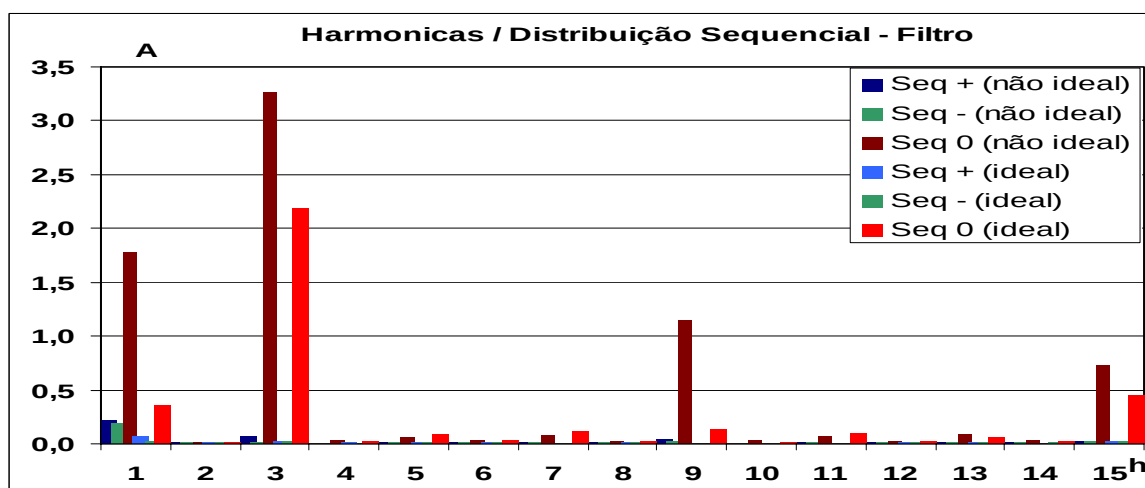
De modo a contemplar esta situação não-ideal, adotou-se uma nova composição para a carga, a qual passa a ser constituída por 3 unidades retificadoras distintas, cujas potências são: $S_A=908\text{VA}$, $S_B=633\text{VA}$ e $S_C=441\text{VA}$. Quanto às demais grandezas, estas voltam a ser as mesmas empregadas para as condições ideais de funcionamento do filtro.



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



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



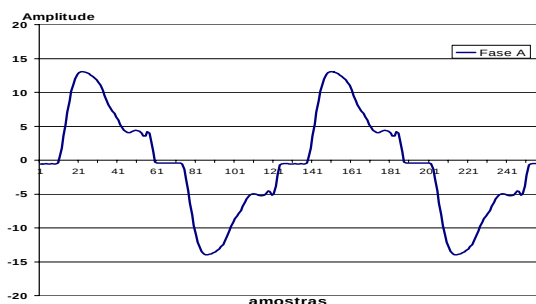
(c) Seqüência de fases para as correntes de linha no filtro – experimental

Figura 5.15 - Distribuição seqüencial para as correntes de linha na carga não-linear, no alimentador e no filtro - senoidal e tensão distorcida - filtro de seqüência zero

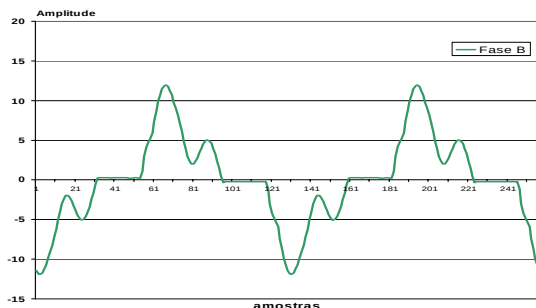
As figuras 5.16-5.22 apresentam os resultados para as correntes de linha registradas na carga não-linear, na alimentação e, por fim, no filtro de sequência zero. Como para os demais casos, ambos os desempenhos, experimental e computacional, são destacados.

(a) Corrente na carga não-linear

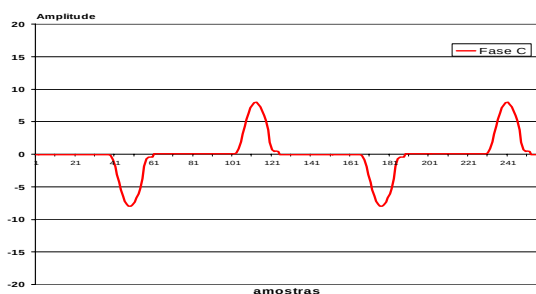
A figura 5.16 apresenta, respectivamente, as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear.



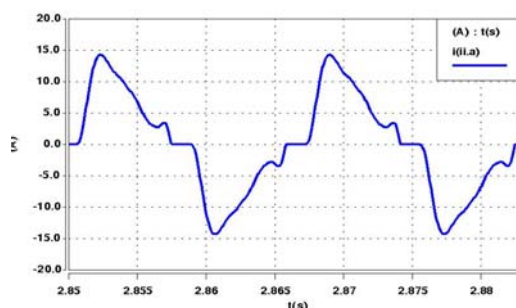
Linha A - carga não-linear - experimental



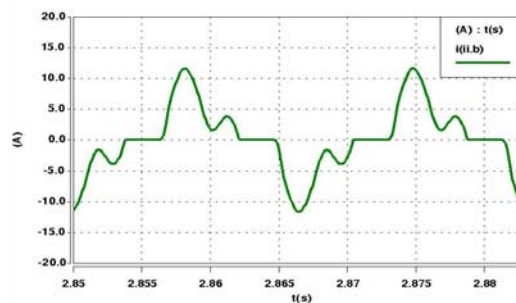
Linha B - carga não-linear - experimental



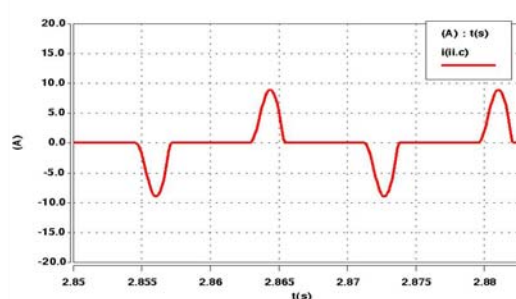
Linha C - carga não-linear - experimental



Linha A - carga não-linear - computacional



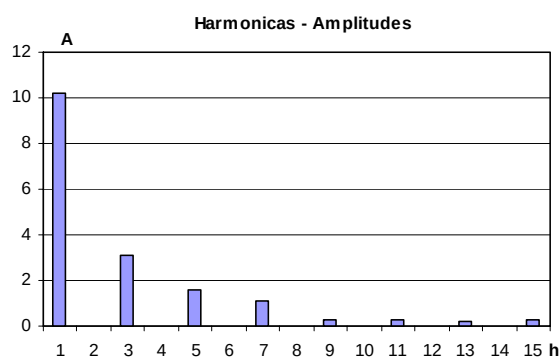
Linha B - carga não-linear - computacional



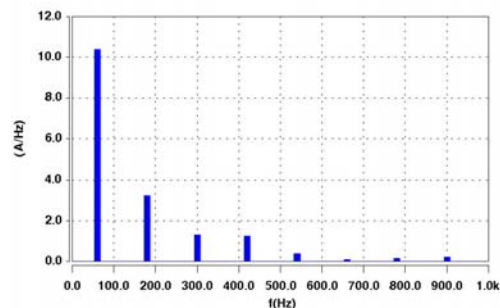
Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.16 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de sequência zero

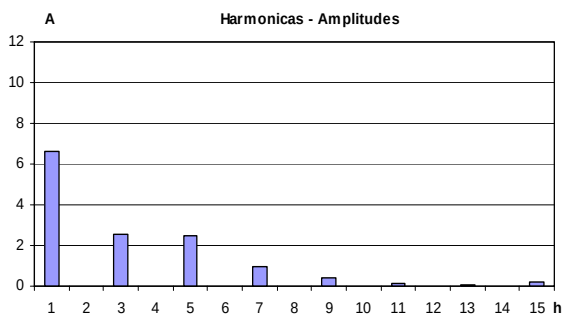
Complementarmente, a figura 5.17 fornece os correspondentes espectros de frequência para as correntes anteriores de pico.



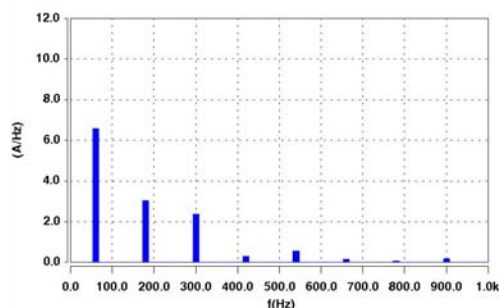
Linha A - carga não-linear - experimental



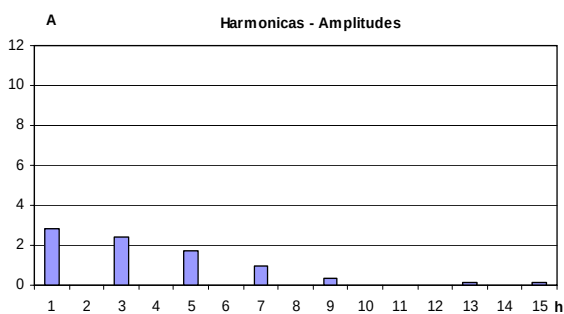
Linha A - carga não-linear - computacional



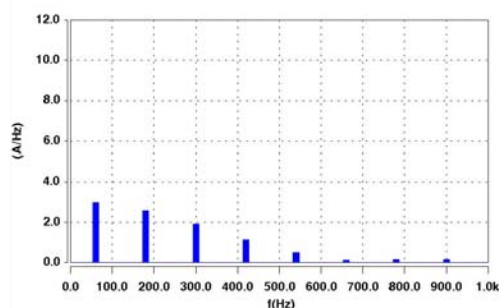
Linha B - carga não-linear - experimental



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - experimental

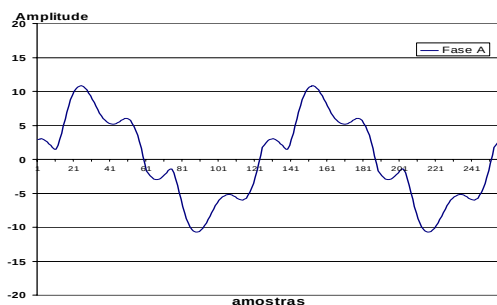


Linha C - carga não-linear - computacional

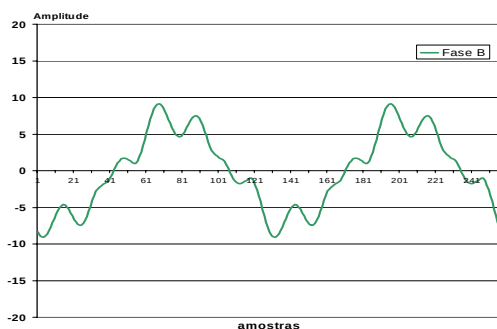
Figura 5.17 - Espectros harmônicos das correntes na carga não-linear - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

(b) Corrente de linha do alimentador

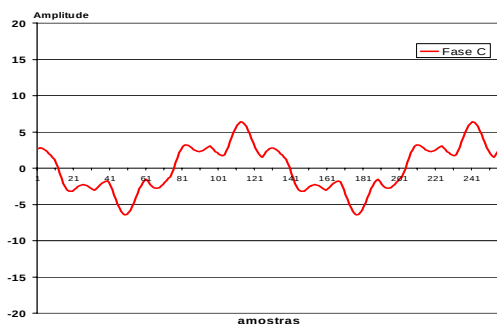
A figura 5.18 mostra, respectivamente, as correntes nas linhas A, B e C no alimentador, obtidas dos ensaios laboratoriais e simulações computacionais.



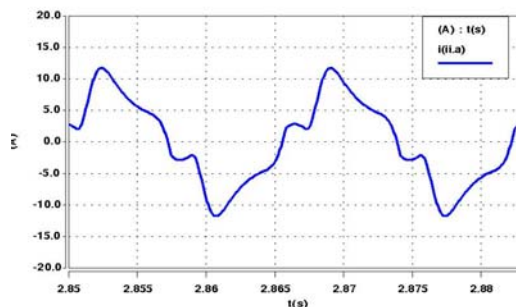
Linha A - alimentador - experimental



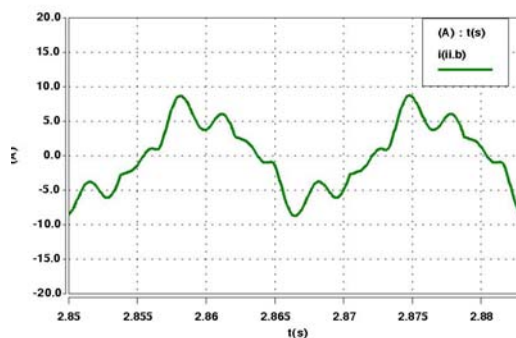
Linha B - alimentador - experimental



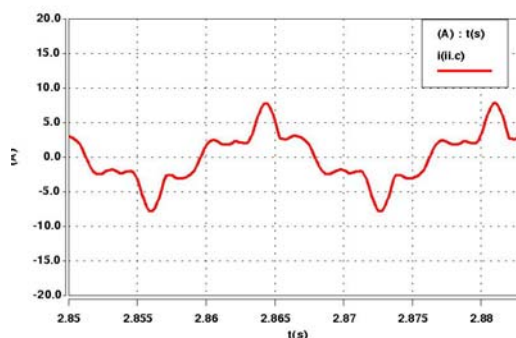
Linha C - alimentador - experimental



Linha A - alimentador - computacional



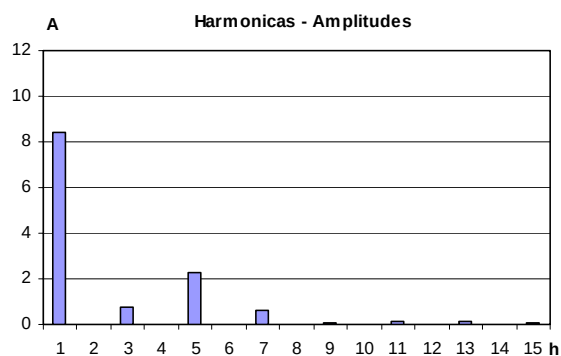
Linha B - alimentador - computacional



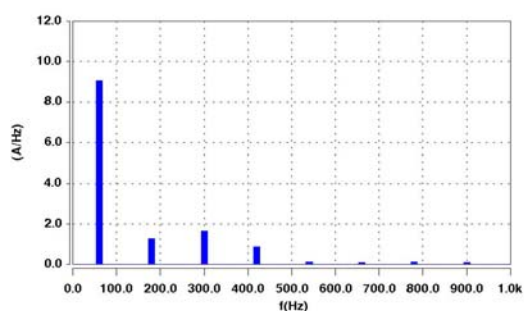
Linha C - alimentador - computacional

Figura 5.18 - Formas de onda das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

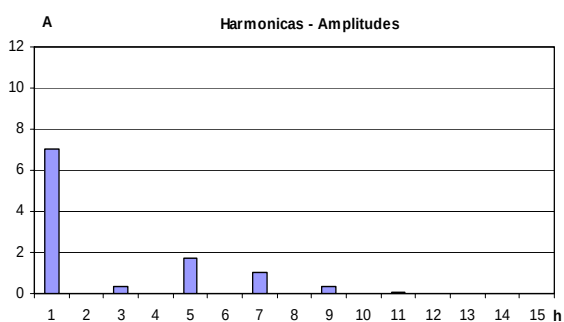
De modo análogo aos casos anteriores, a figura 5.19 é indicativa dos espectros harmônicos das correntes de pico na alimentação.



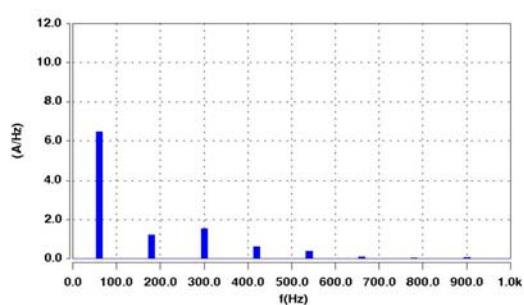
Linha A - alimentador - experimental



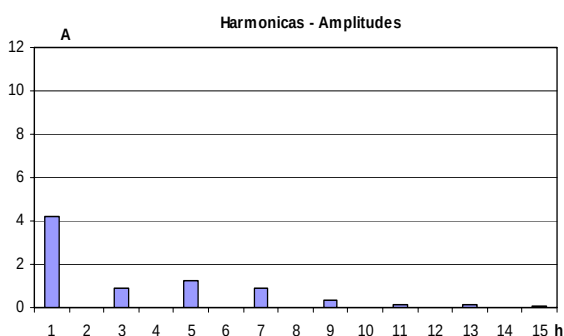
Linha A - alimentador - computacional



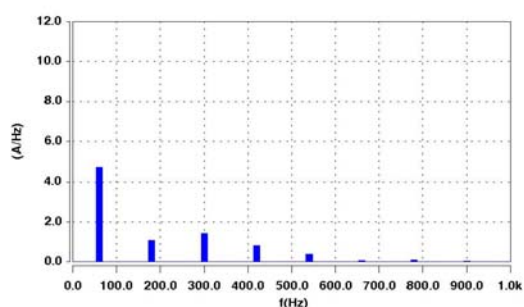
Linha B - alimentador - experimental



Linha B - alimentador - computacional



Linha C - alimentador - experimental

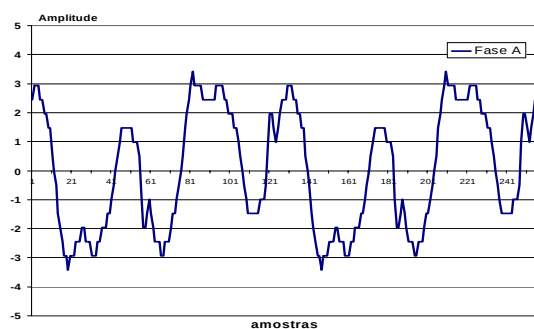


Linha C - alimentador - computacional

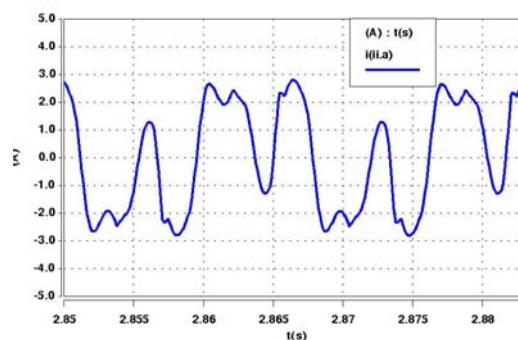
Figura 5.19 - Espectros harmônicos das correntes de linha no alimentador - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada

(c) Corrente de linha no filtro de seqüência zero

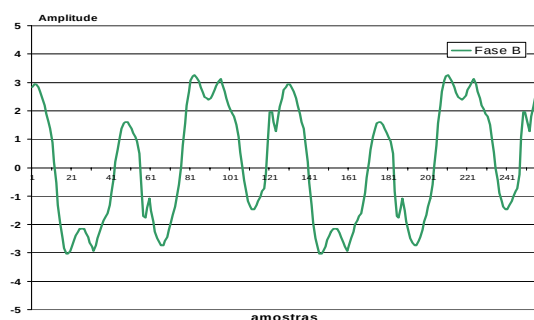
Por fim, a figura 5.20 fornece, respectivamente, as correntes de linha A, B e C do filtro eletromagnético, de forma experimental e computacional.



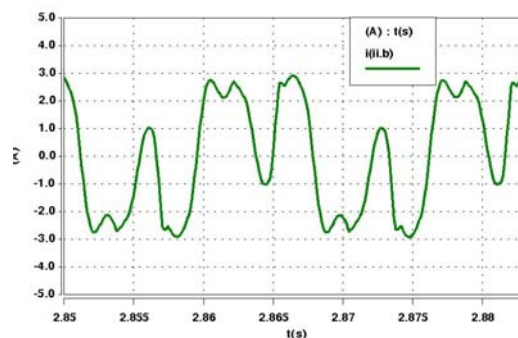
Linha A - filtro - experimental



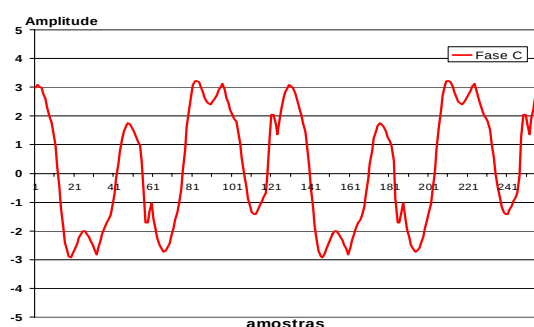
Linha A - filtro - computacional



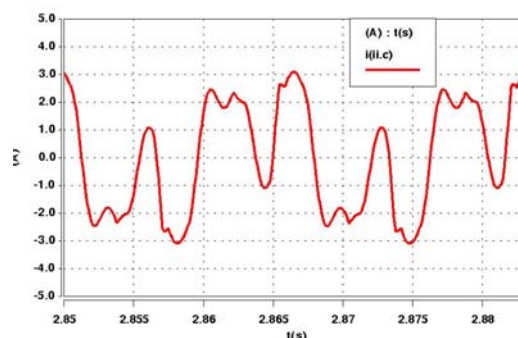
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



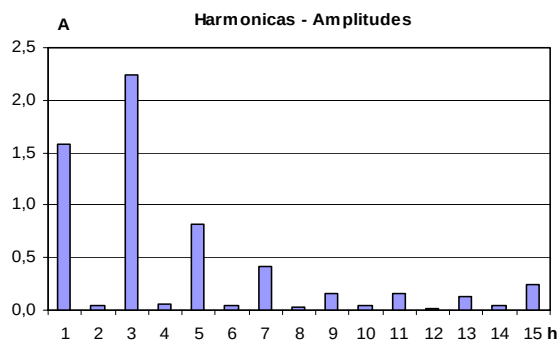
Linha C - filtro - experimental



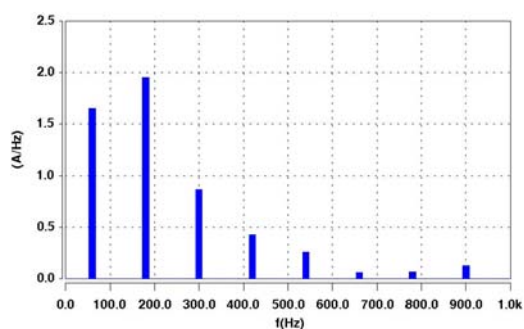
Linha C - filtro - computacional

Figura 5.20 - Formas de onda das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

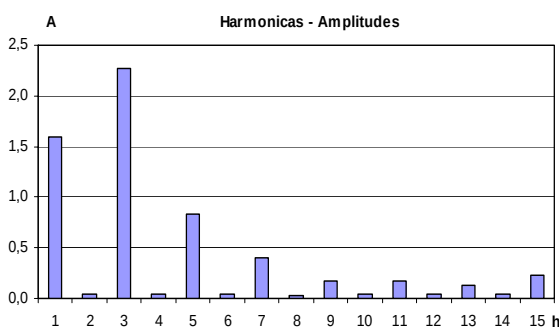
A figura 5.21 indica os correspondentes espectros harmônicos para as correntes de pico.



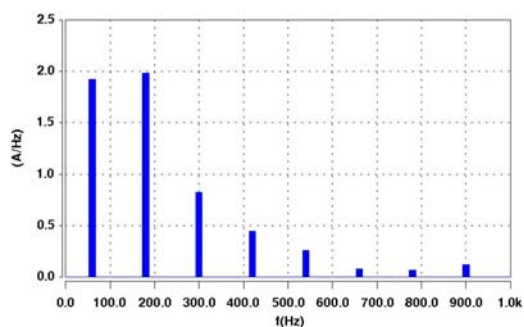
Linha A - filtro - experimental



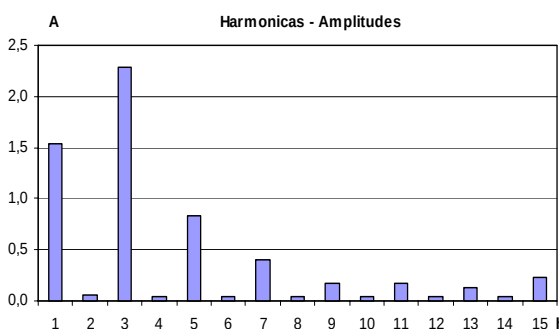
Linha A - filtro - computacional



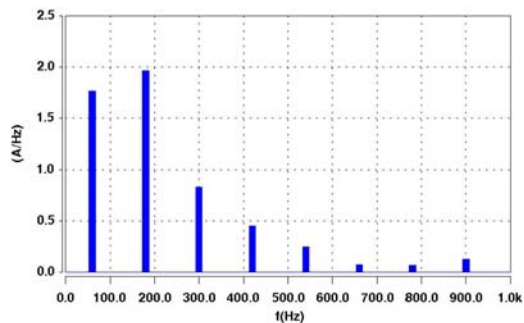
Linha B - filtro - experimental



Linha B - filtro - computacional



Linha C - filtro - experimental

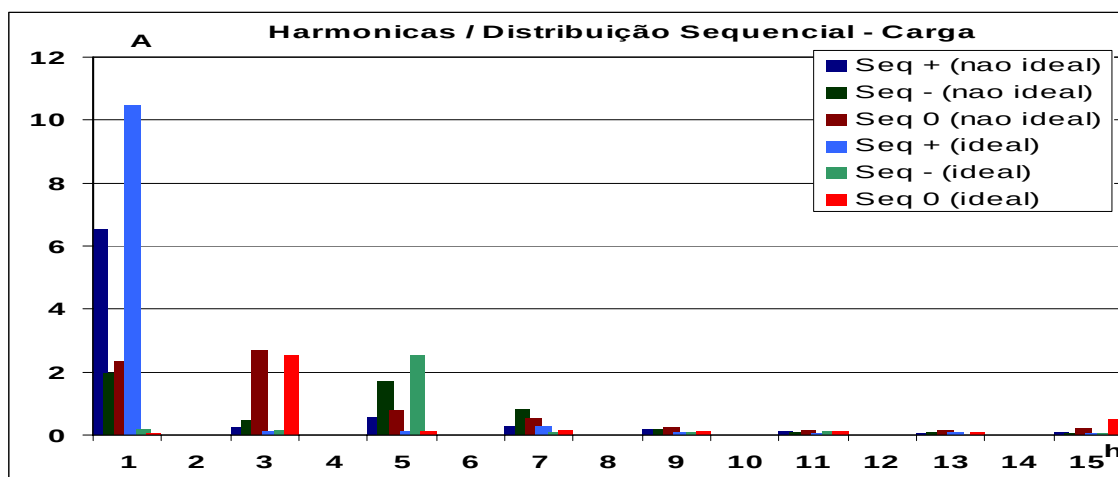


Linha C - filtro - computacional

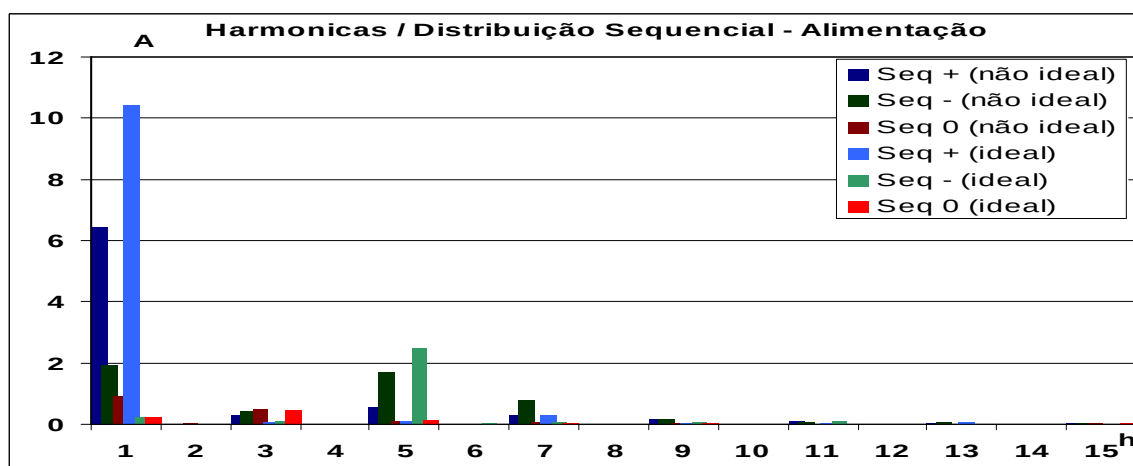
Figura 5.21 - Espectros harmônicos das correntes de linha no filtro - experimental e computacional - carga não-linear desequilibrada - filtro de seqüência zero

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

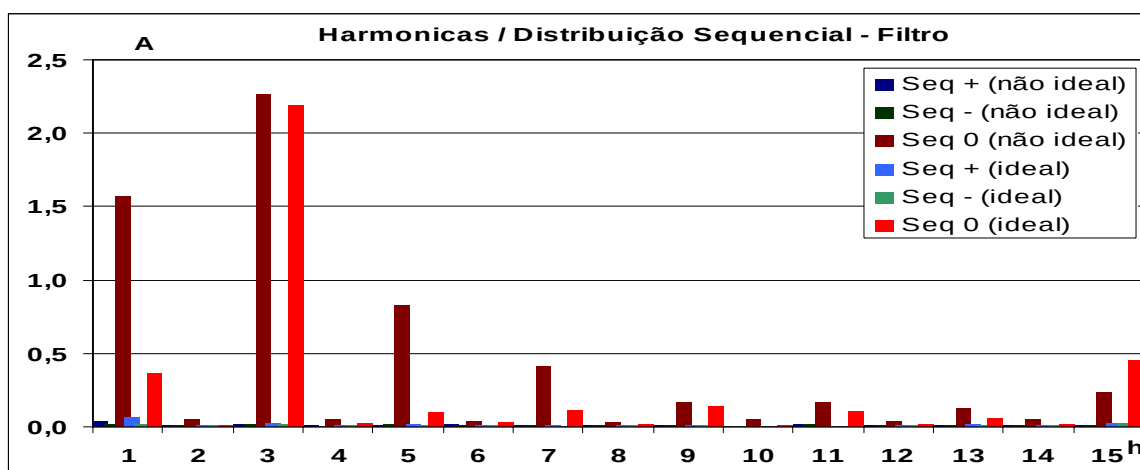
A figura 5.22 apresenta os espectros harmônicos, com a distribuição de seqüências positivas, negativas e zero das correntes de linha nos mesmos pontos analisados anteriormente. Apenas os resultados experimentais são considerados.



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



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



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

Figura 5.22 - Espectros harmônicos com distribuição sequencial de fases para as correntes de linha na carga não-linear, alimentador e filtro de sequência zero - senoidal e carga não-linear desequilibrada - filtro de sequência zero

Os resultados evidenciam que a operação da carga não-linear desequilibrada contribuiu significativamente para o aumento da componente fundamental de corrente de sequência zero. Também, observa-se que as componentes harmônicas são afetadas e o conjunto incrementa a corrente no filtro. Mais uma vez, fica constatado que o prévio conhecimento das condições operativas do filtro sob a ação de uma carga desequilibrada também se constitui em fator relevante ao correto dimensionamento e construção do filtro.

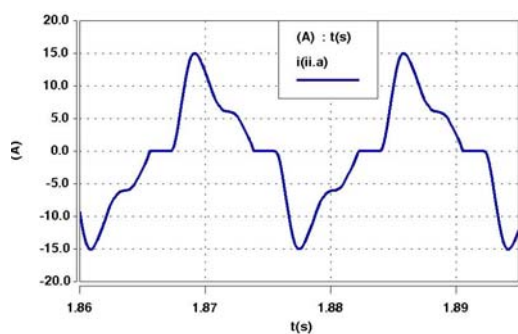
Caso a-4 - Variação da indutância de dispersão

Para fins da avaliação da alteração desta grandeza, a estratégia empregada consistiu em variar a área de dispersão do filtro eletromagnético, impactando, assim sobre o valor da indutância destacada.

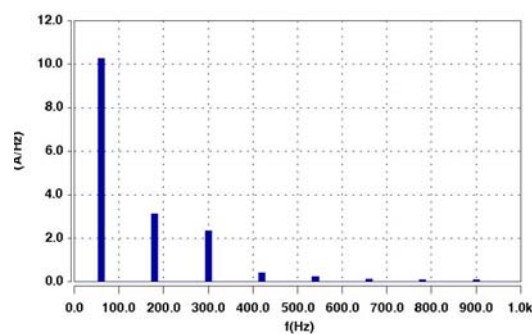
Mantendo-se as condições operacionais estabelecidas na avaliação do capítulo anterior, e promovendo-se, desta vez, uma alteração expressiva no valor da indutância de dispersão do filtro (15 vezes maior), obteve-se, para o estudo computacional, os resultados constantes nas figuras 5.23-5.26.

(a) Corrente na carga não-linear

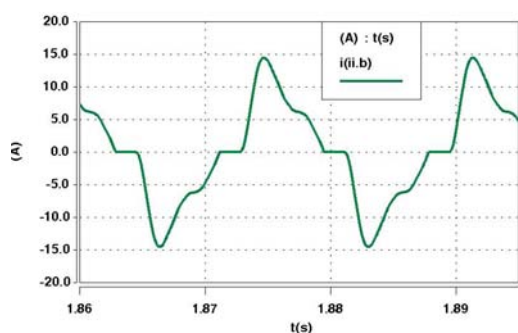
A figura 5.23 apresenta as correntes de linha A, B e C obtidas na carga não-linear e os correspondentes espectros harmônicos, de forma computacional.



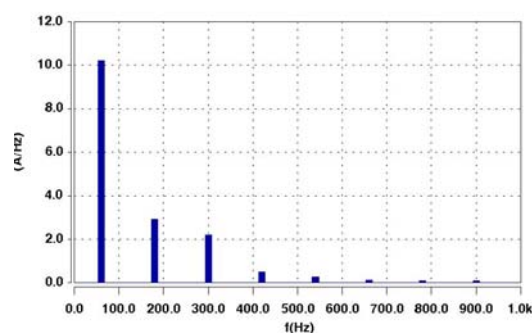
Linha A - carga não-linear - computacional



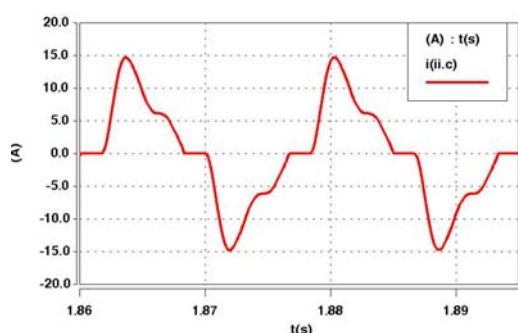
Linha A - carga não-linear - computacional



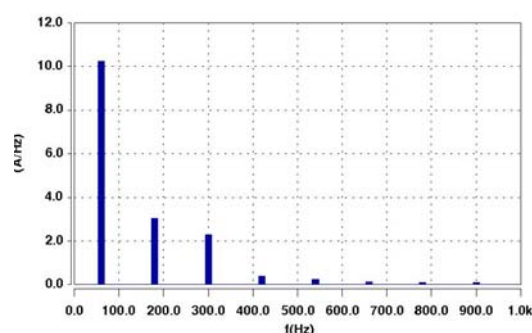
Linha B - carga não-linear - computacional



Linha B - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - computacional



Linha C - carga não-linear - computacional

Figura 5.23 - Formas de onda das correntes de linha na carga não-linear e respectivos espectros harmônicos - variação da indutância de dispersão - filtro de sequência zero

(b) Corrente de linha do alimentador

A figura 5.24 apresenta as correntes nas linhas A, B e C do alimentador, obtidas computacionalmente, e seus respectivos espectros harmônicos.