

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas agregada à modelagem de cargas abordada nos capítulos anteriores apresentou resultados satisfatórios em processos de validação computacionais. Não obstante ao bom desempenho computacional destes modelos matemáticos, é importante ressaltar que as investigações realizadas contemplaram situações bem definidas e com parâmetros elétricos calculados através de formulações no domínio da frequência. Estas condições, apesar de todos os avanços obtidos nas últimas décadas, tanto no campo da modelagem de sistemas elétricos quanto na elaboração de aplicativos computacionais, não englobam, normalmente, situações passíveis de ocorrência em ambientes reais ou em laboratório. Como exemplos destas particularidades, citam-se: influências nos equipamentos de medição, erros inerentes aos sistemas de aquisição, variações na fonte de alimentação, dentre outras.

Diante destas observações e objetivando avaliar a metodologia proposta em sistemas físicos, o presente capítulo contempla, em um primeiro momento, ensaios laboratoriais sob condições controladas, empregando circuitos semelhantes àqueles utilizados nas avaliações computacionais. Em uma segunda abordagem, o aplicativo ATRES é utilizado para um complexo elétrico real.

Nestes termos, o presente capítulo compreende ações direcionadas ao cumprimento das seguintes etapas:

- Montagem laboratorial do arranjo físico selecionado;
- Realização de experimentos sob condições operacionais distintas;
- Análise dos resultados obtidos;
- Aplicação da metodologia em um sistema real e análise dos resultados.

5.2 – SISTEMA TESTE – MONTAGEM LABORATORIAL

De forma semelhante à definição do sistema elétrico considerado nas avaliações computacionais, o sistema teste adotado nos experimentos em laboratório, pelas suas características, busca a representação de uma unidade consumidora típica, com cargas resistivas, indutivas, capacitivas e cargas especiais ou não-lineares. A figura 5.1 apresenta o arranjo físico selecionado para o sistema teste experimental.

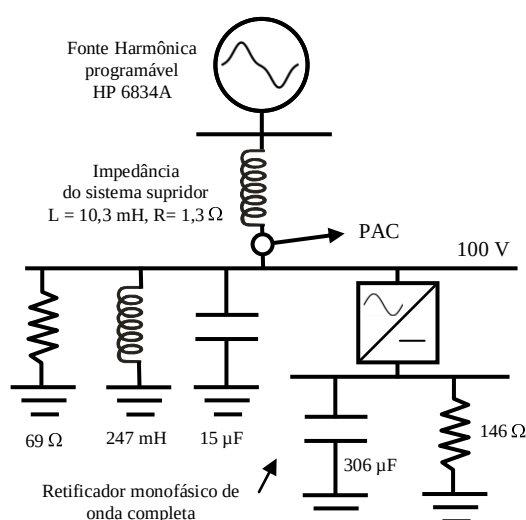


Figura 5.1 – Arranjo físico utilizado para os testes de desempenho.

Conforme indicado na figura, de acordo com restrições impostas pela estrutura laboratorial, o nível de tensão considerado nos ensaios é de, aproximadamente, 100 [V], ou seja, baixa tensão. A opção por este nível de tensão está relacionada ao nível da corrente resultante, cujo valor é limitado pela fonte de tensão exigida pelos ensaios.

O processo de avaliação laboratorial da metodologia de separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas impõe a utilização de um sistema isolado e com distorções conhecidas, pois, para que os resultados sejam confiáveis, torna-se imprescindível o conhecimento das características elétricas do sistema supridor. Conseqüentemente, a utilização da rede de suprimento da concessionária local torna-se inviável, pois esta possui características variáveis de módulo e ângulo da tensão e, principalmente, distorções harmônicas desconhecidas, portanto, não permite a correta identificação das distorções de sua responsabilidade. Assim, para os ensaios laboratoriais, a fonte de tensão da concessionária será representada por uma fonte harmônica da HP, modelo 6834A, com potência de 4500 [VA]. Esta, por ser programável, viabiliza a geração de uma fonte de tensão com quaisquer distorções harmônicas desejáveis.

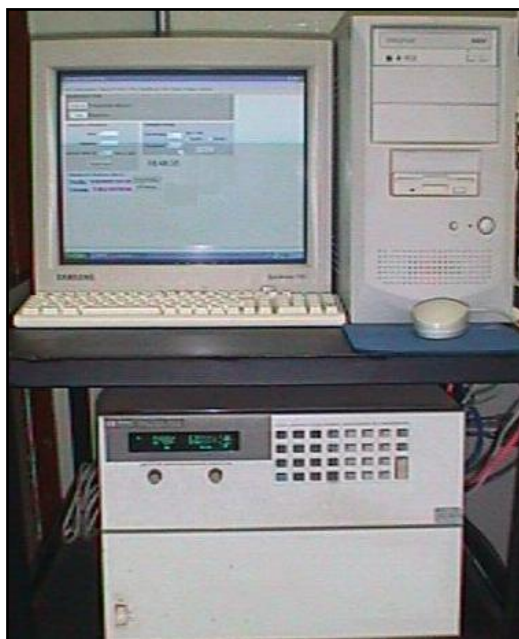


Figura 5.2 – Fonte de tensão utilizada nos ensaios.

A impedância do sistema supridor é representada por um indutor com os parâmetros indicados na figura 5.1. Este componente fornece uma impedância conhecida e de magnitude significativamente superior à impedância interna da fonte de tensão, permitindo o cálculo das impedâncias harmônicas representativas da rede de suprimento da concessionária.

No arranjo laboratorial, as cargas não-lineares, contidas nas instalações do consumidor, são representadas por um retificador monofásico suprindo uma carga constituída por um resistor e um capacitor. A parcela linear da carga é caracterizada por um resistor, um capacitor e um indutor. Este último, apesar de possuir núcleo de ferro e apresentar uma curva de saturação não-linear, pode ser considerado linear para a tensão adotada nos ensaios (100 V). A curva de saturação mostrada na figura 5.3 esclarece esta propriedade.

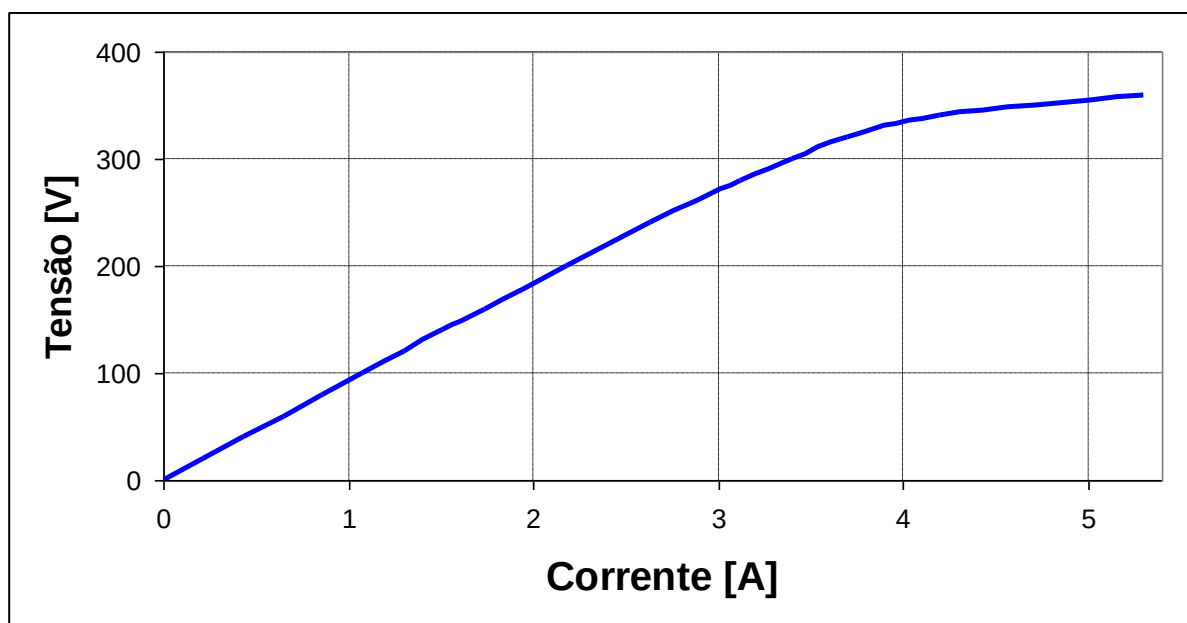


Figura 5.3 – Curva de saturação da indutância da carga.

Para a realização das medições das tensões e correntes harmônicas junto ao PAC, utilizou-se do equipamento MARH-21[38]. Este medidor realiza a aquisição dos ciclos da onda de tensão e corrente, com seus respectivos harmônicos, e os envia para um microcomputador, onde os mesmos são processados e armazenados.

Os componentes físicos que perfazem o sistema teste são mostrados pelas figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

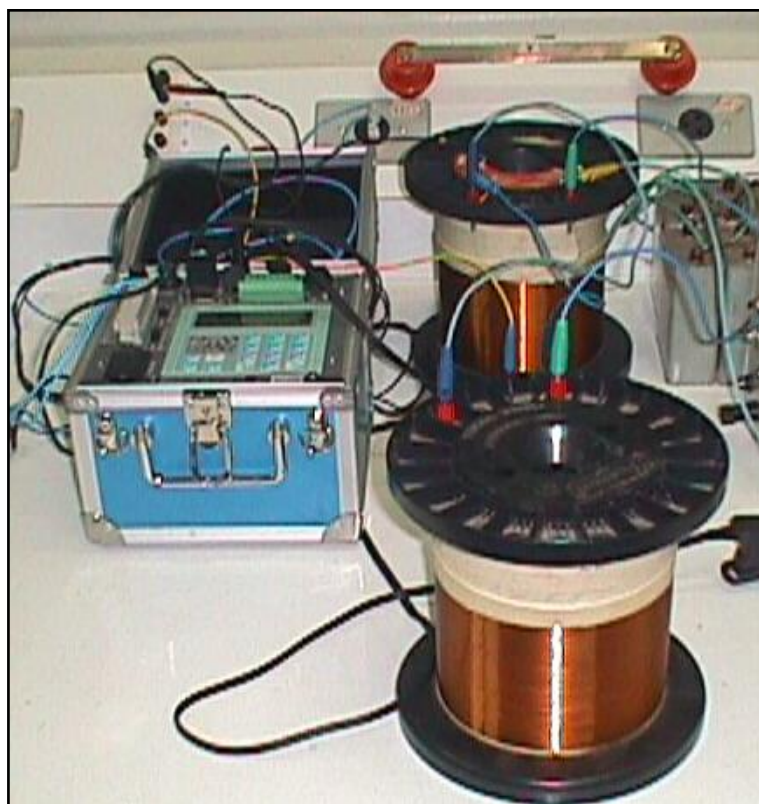


Figura 5.4 – Foto do indutor representativo da impedância da concessionária e do equipamento de medição.

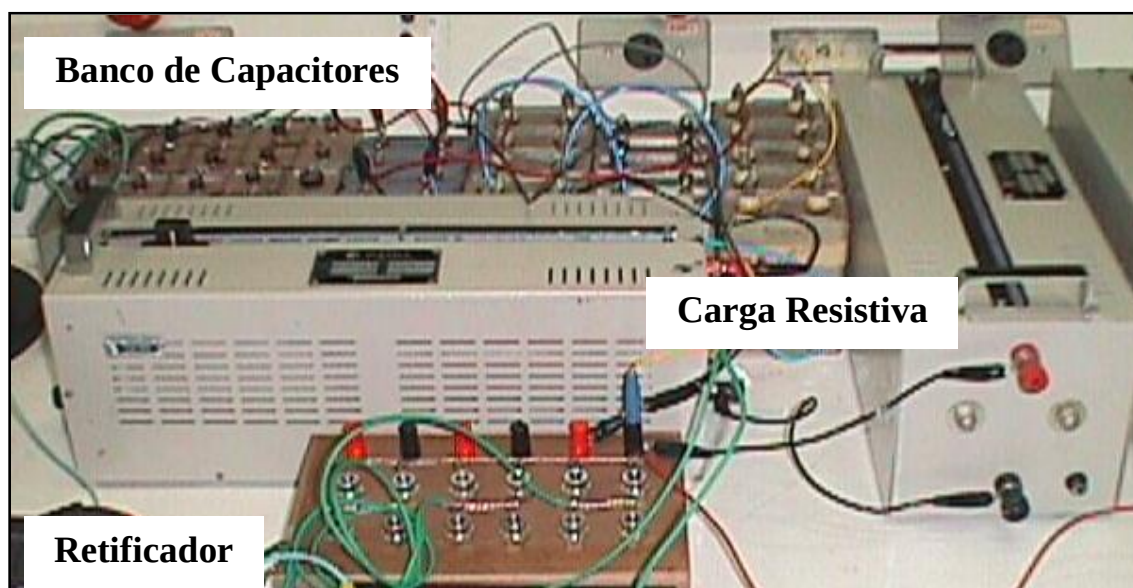


Figura 5.5 – Foto do retificador com suas cargas (resistiva e capacitiva).

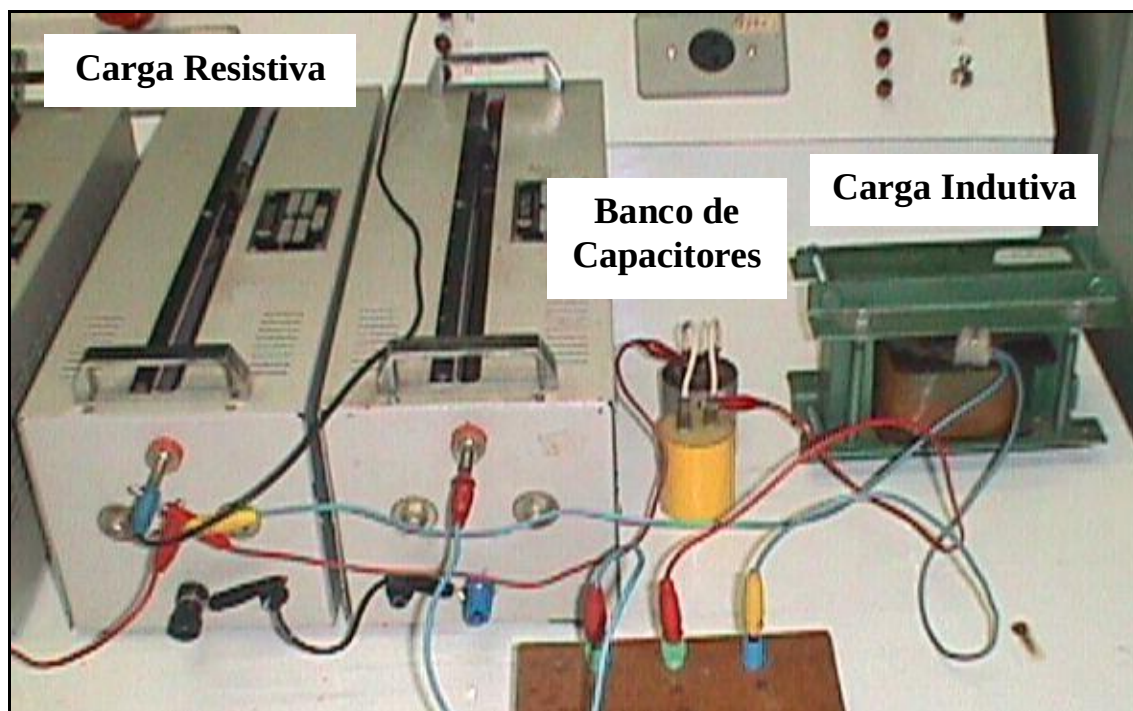


Figura 5.6 – Foto das cargas lineares do consumidor.

5.2.1 – Impedância Harmônica do Supridor

A aplicação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas determina o prévio conhecimento da impedância harmônica da concessionária para cada ordem. Estes parâmetros, para o sistema teste, correspondem ao espectro de impedâncias do indutor representativo da concessionária.

Para a obtenção destes valores optou-se pelo ensaio do indutor para todas as frequências consideradas nas análises. Utilizando da mesma fonte de tensão do sistema teste, ao indutor foram aplicadas tensões cujas frequências abrangeram da ordem de número 2 (120 Hz) até a 13 (780 Hz). Esta faixa corresponde às frequências de maior amplitude geradas pelo retificador do sistema teste e, portanto, são as ordens analisadas no presente trabalho.

Assim procedendo, a figura 5.7 apresenta a curva impedância versus frequência deste componente, ressaltando que os valores indicados são os mesmos utilizados no cálculo das parcelas de responsabilidade.

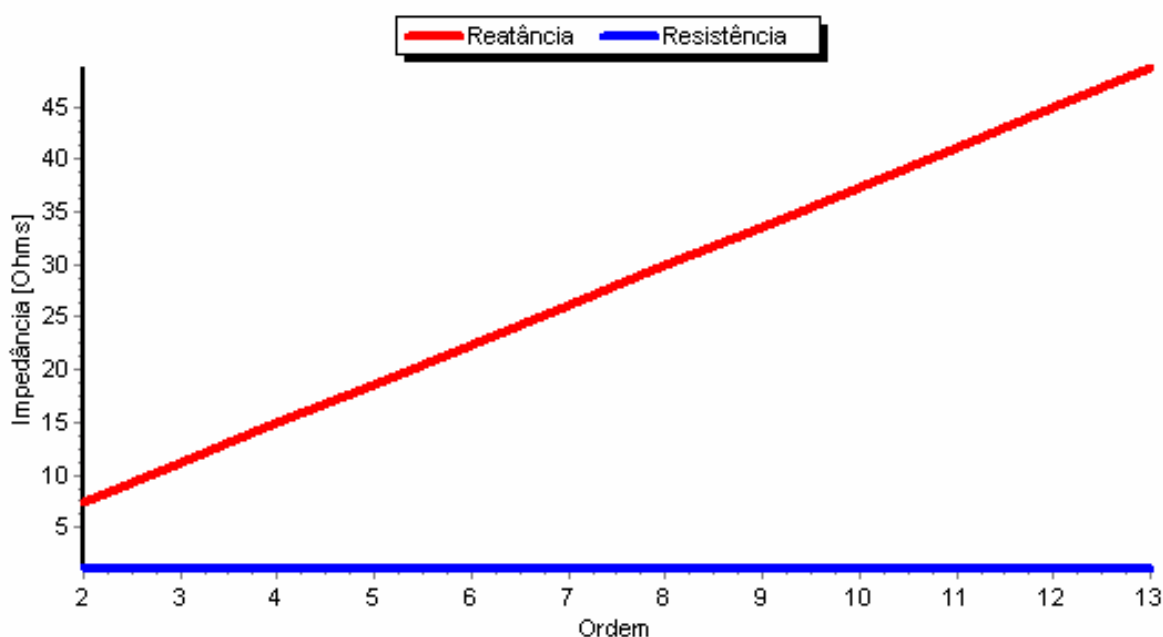


Figura 5.7 – Curva impedância x frequência do indutor representativo da concessionária.

5.2.2 – Distorções Harmônicas Esperadas

A utilização de arranjos laboratoriais tem a propriedade de possibilitar o cálculo das distorções harmônicas de tensão esperadas para o consumidor e para a concessionária. Esta característica é resultado do conhecimento de todos os componentes empregados no sistema teste, ou seja, todas as impedâncias harmônicas referentes às cargas lineares e ao sistema supridor são conhecidas ou passíveis de medição/ensaio. Por razões óbvias, esta facilidade somente é obtida em laboratório e sob condições controladas.

A determinação da tensão harmônica de responsabilidade exclusiva do consumidor adota como premissas a impedância total do PAC (impedância de barra) e a corrente harmônica injetada pelo consumidor. Estes parâmetros permitem o cálculo das tensões harmônicas resultantes somente das cargas não-lineares presentes nas instalações do consumidor. A figura 5.8 exemplifica esta situação.

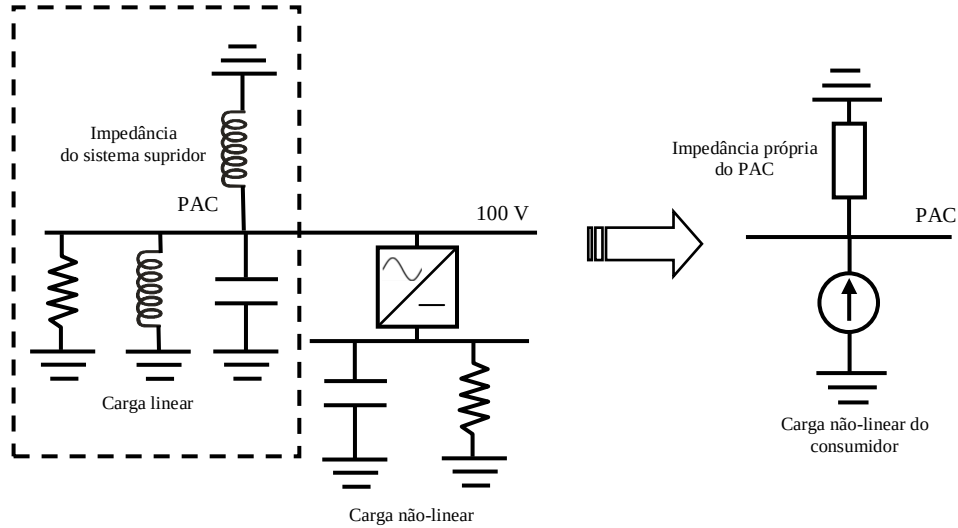


Figura 5.8 – Circuito equivalente para cálculo das tensões harmônicas exclusivas do consumidor.

Na figura, a conexão em paralelo das cargas lineares do consumidor e da impedância da concessionária corresponde à chamada impedância do PAC. As correntes harmônicas injetadas pela carga não-linear do sistema teste (retificador) multiplicadas por esta impedância resulta na tensão harmônica exclusiva do consumidor. Portanto, a determinação das distorções provenientes do consumidor implica na medição das correntes injetadas por suas cargas não-lineares ($\dot{I}_h^{ic}$) e no conhecimento das impedâncias harmônicas do PAC ($\dot{Z}_h^b$), conforme expresso em (5.1).

$$\dot{V}_h^c = \dot{I}_h^{ic} \cdot \dot{Z}_h^b \quad (5.1)$$

A tensão harmônica exclusiva do sistema supridor é expressa por:

$$\dot{V}_h^s = \dot{V}_h^m - \dot{V}_h^c \quad (5.2)$$

Como as cargas não-lineares do sistema teste são representadas por um retificador, a medição das correntes harmônicas deste componente soluciona a primeira incógnita. Quanto à impedância do PAC, por meio de procedimento idêntico àquele adotado para a obtenção da impedância da concessionária, é possível o cálculo destes valores. Para tanto, aplica-se uma

tensão de frequência definida no arranjo paralelo definido pelo indutor da concessionária e os elementos passivos do consumidor e, através da corrente resultante, calcula-se a impedância harmônica do PAC. Os ensaios laboratoriais resultaram na curva impedância versus frequência mostrada pela figura 5.9.

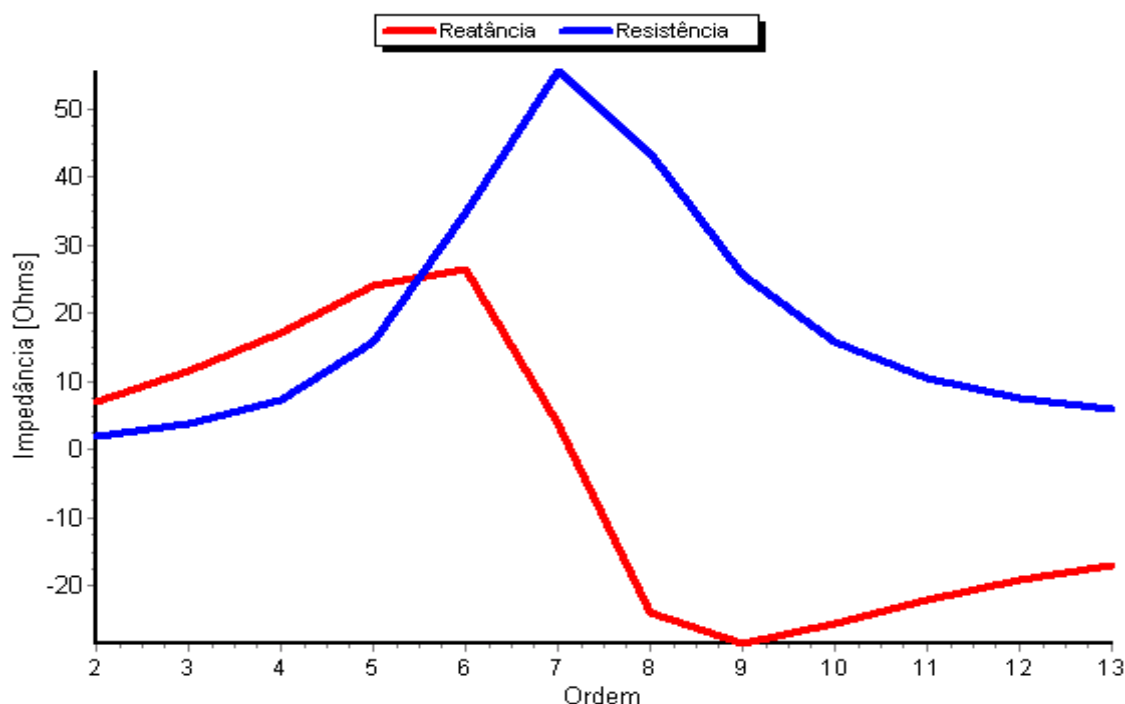


Figura 5.9 – Curva impedância x frequência da impedância de barra do PAC.

A curva acima demonstra que o PAC possui um acréscimo substancial em sua impedância nas proximidades da harmônica de ordem 7. Este atributo, característica de ressonância, é resultado do paralelismo entre o capacitor do consumidor e o indutor representativo da impedância da concessionária. Diante desta propriedade, há de se esperar amplificações nas distorções para esta harmônica.

5.3 – ENSAIOS LABORATORIAIS

Empregando o arranjo físico anterior e explorando as características da fonte de tensão utilizada nos ensaios, procedeu-se ao processo de avaliação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Os distintos casos selecionados para apresentação e discussão encontram-se sintetizados abaixo. Estas situações visam abranger uma ampla gama de condições operacionais passíveis de ocorrência em sistemas reais e contemplam distorções harmônicas advindas do consumidor ou da concessionária. Além das diferenças em módulo, os estudos também buscam a identificação do grau de influência da defasagem angular entre as fontes de distorções harmônicas de ambas as partes.

Nestes termos, os casos selecionados estão indicados na tabela abaixo.

Tabela 5.1 – Descrição dos casos selecionados.

Caso	Descrição	Consumidor	Concessionária
01	Fonte de tensão puramente senoidal suprimindo as cargas do sistema teste	Contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Sem distorções harmônicas.
02	Sistema teste suprido por fonte de tensão distorcida.		Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 6% com ângulo 0° *; - 5ª: 4% com ângulo 0°; - 7ª: 2% com ângulo 0°.
03			Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 6% com ângulo 180°; - 5ª: 4% com ângulo 180°; - 7ª: 2% com ângulo 180°.

Caso	Descrição	Consumidor	Concessionária
04	Sistema teste suprido por fonte de tensão distorcida.	Contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 16% com ângulo 0°; - 5ª: 13% com ângulo 0°; - 7ª: 8% com ângulo 0°.
05			Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 16% com ângulo 180°; - 5ª: 13% com ângulo 180°; - 7ª: 8% com ângulo 180°.
06	Sistema teste sem cargas não-lineares (retificador desconectado)	<u>Não</u> contribui com as distorções harmônicas no PAC.	Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 6% com ângulo 0°; - 5ª: 4% com ângulo 0°; - 7ª: 2% com ângulo 0°.
07	alimentado por fonte de tensão contendo distorções harmônicas.		Contendo as seguintes distorções na tensão: - 3ª: 16% com ângulo 0°; - 5ª: 13% com ângulo 0°; - 7ª: 8% com ângulo 0°.

* Os valores percentuais e a defasagem angular são referentes à tensão fundamental de 100 [V].

a) Caso 01

Conforme mencionado, nesta situação operacional o sistema teste é suprido por uma fonte de tensão sem distorções harmônicas quando operando a vazio, ou seja, como premissa, é conhecido que todas as distorções harmônicas são provenientes do consumidor. Os resultados, cálculos e comentários sobre este caso são apresentados na sequência.

Resultados experimentais

A figura 5.10 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.

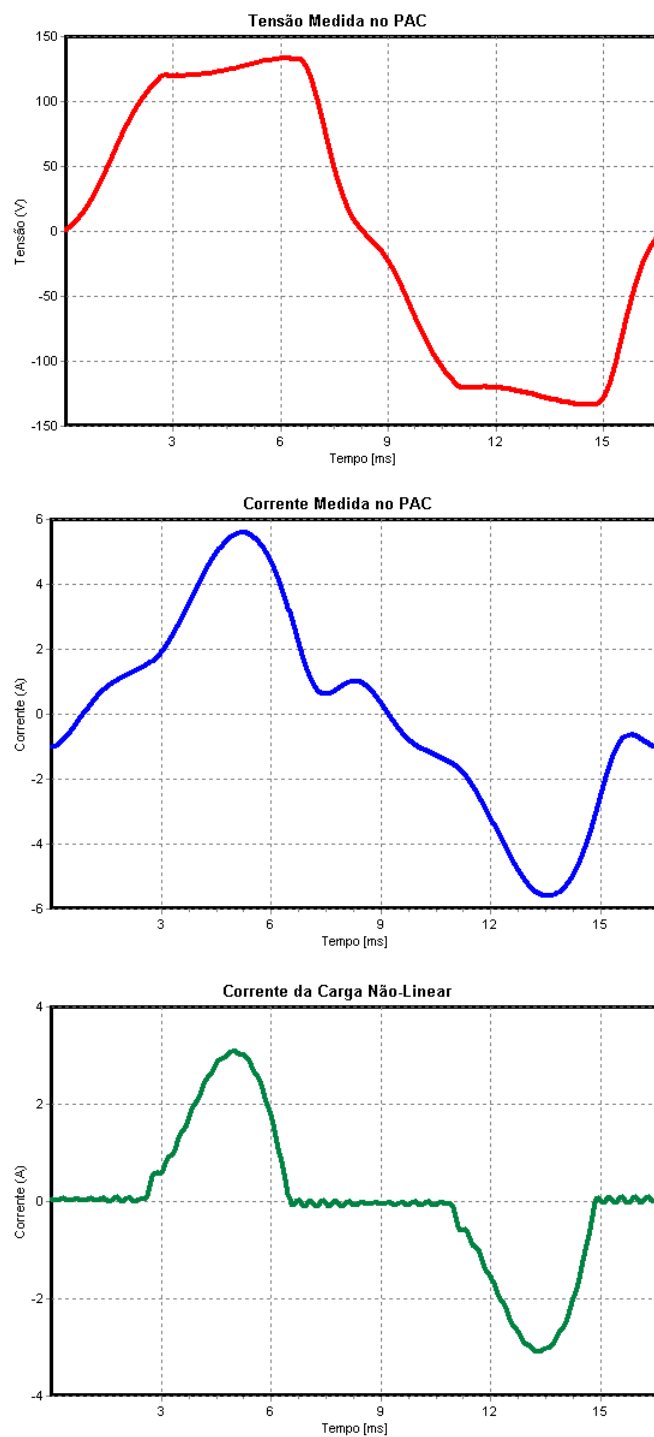


Figura 5.10 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.

Complementarmente, a figura 5.11 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

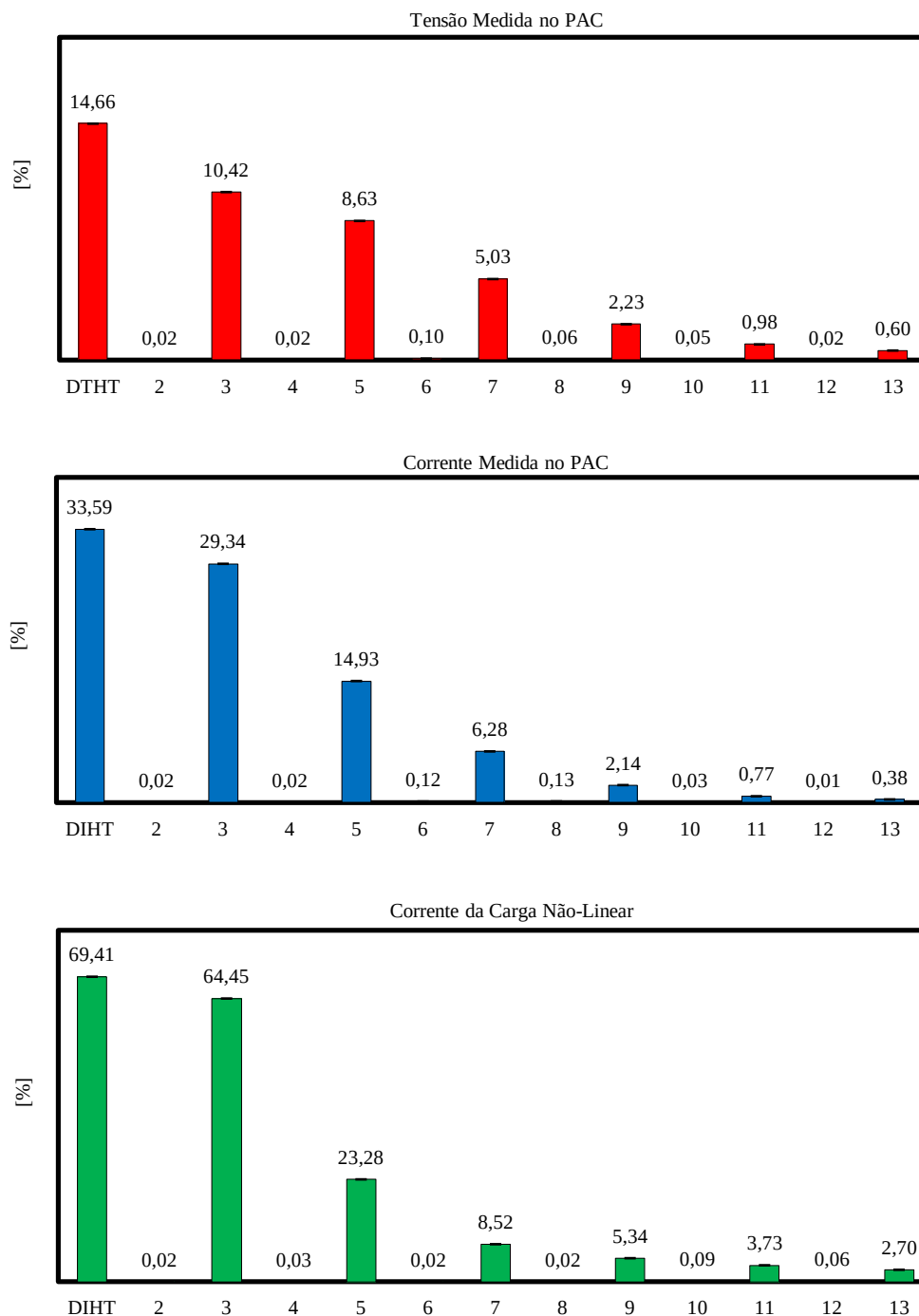


Figura 5.11 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 01.

Conforme observado na figura anterior, somente são apresentadas as harmônicas inferiores a 800 Hz (até a 13ª ordem). A escolha desta faixa de frequências está relacionada com as amplitudes observadas para estas frequências. Somente os valores superiores a 0,5% para as distorções de tensão foram considerados.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

Para a aplicação da proposta de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, inicialmente, aos sinais de tensão e corrente medidos no PAC são aplicadas as formulações referentes à modelagem da carga equivalente do consumidor apresentadas no Capítulo III. Os parâmetros indicados na tabela 5.2 são decorrentes deste procedimento.

Tabela 5.2 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 01

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
35,66	382,58	1,80

Cabe destacar que, necessariamente, os valores de R, L e C não são semelhantes aos componentes físicos, pois estes representam o equivalente entre a parcela linear e não-linear da carga do consumidor e, portanto, são influenciados pelas características de ambas as cargas.

Prosseguindo com o processo de atribuição das responsabilidades, o emprego dos parâmetros acima indicados nas equações contidas no Capítulo II resulta nos espectros harmônicos de tensão indicados na figura 5.12. Nesta figura, os valores denominados por “esperados” são considerados como referência, visto terem sido determinados através dos parâmetros reais e conhecidos do sistema teste. Por outro lado, aqueles identificados como “calculados” correspondem aos resultados da aplicação da metodologia proposta.

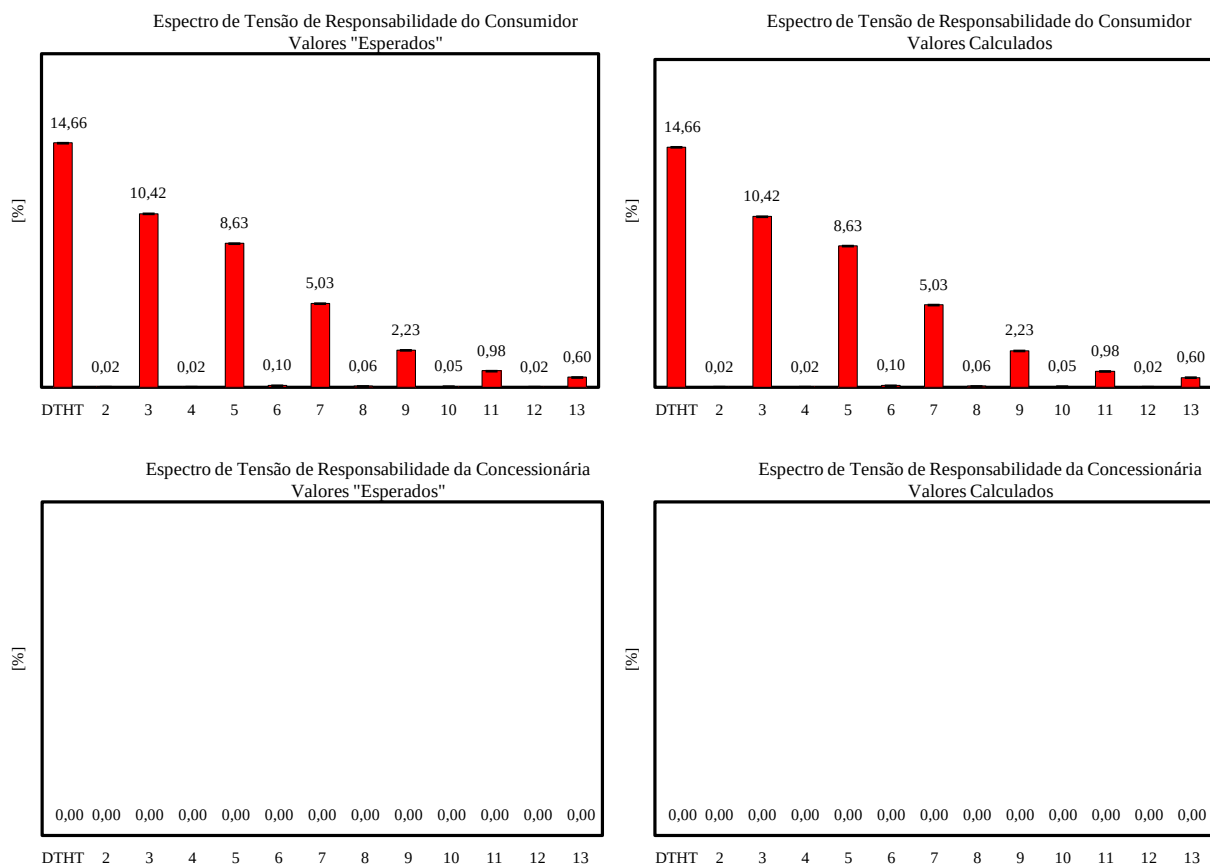


Figura 5.12 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 01.

Comentários

Os resultados obtidos evidenciaram que:

- Para o caso em questão, a metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios, indicando corretamente as parcelas de responsabilidade sobre as distorções provenientes do consumidor e da concessionária.
- Os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciam de forma significativa na separação das responsabilidades quando o consumidor é o principal responsável pelas distorções.

b) Caso 02

Para esta situação operacional, as cargas lineares e não-lineares do sistema testes são mantidas inalteradas, enquanto que a fonte de alimentação é programada para fornecer distorções harmônicas pré-definidas. As seguintes frequências foram contempladas para este caso:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 6% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

A opção pelos valores acima está baseada nos percentuais observados para as tensões harmônicas do caso anterior. Nota-se que as distorções pré-definidas são inferiores àquelas de responsabilidade exclusiva do consumidor. No entanto, esta constatação não significa que o consumidor, também para este caso, continuará sendo o principal responsável pelas distorções de tensão, pois as distorções pré-definidas correspondem à operação em vazio da fonte de alimentação. Adicionalmente, a parcela não-linear da carga do consumidor estará sujeita a uma nova condição operacional e, conseqüentemente, as correntes harmônicas geradas por este componente poderão sofrer alterações.

Seguindo a mesma formação utilizada no caso anterior, na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários sobre esta nova condição.

Resultados experimentais

A figura 5.13 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.

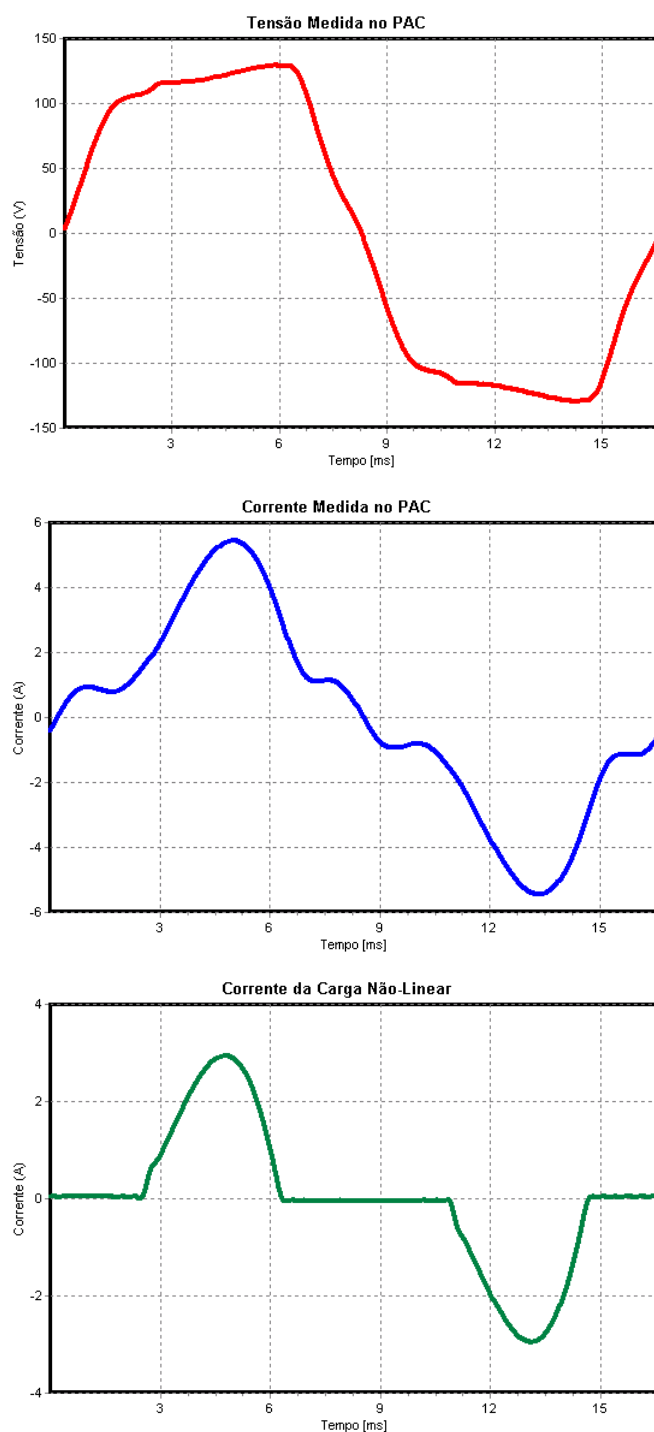


Figura 5.13 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.

Complementarmente, a figura 5.14 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

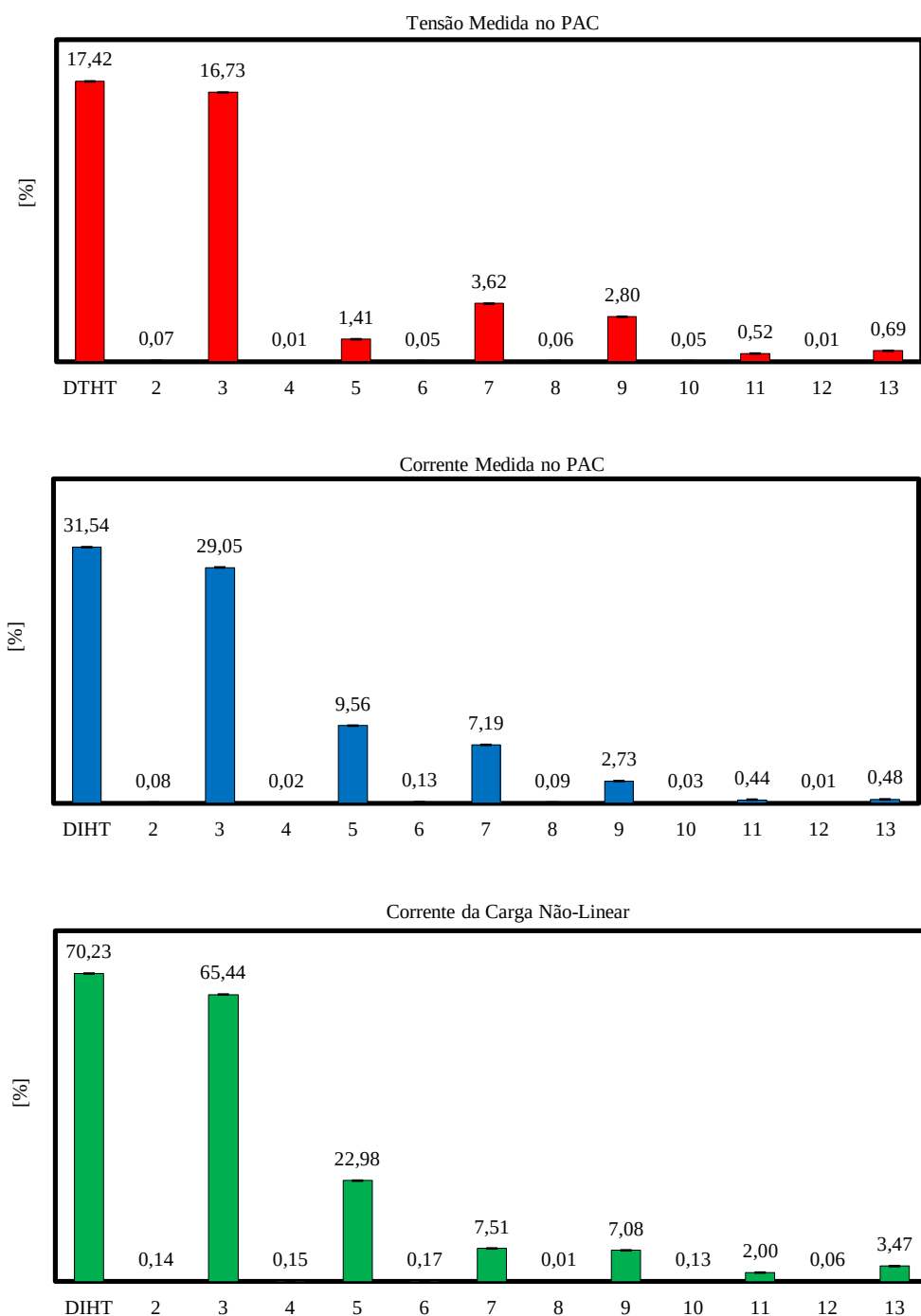


Figura 5.14 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 02.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.3 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 02.

Tabela 5.3 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 02.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
36,06	193,22	19,58

Prosseguindo com o processo de atribuição das responsabilidades, os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.15.

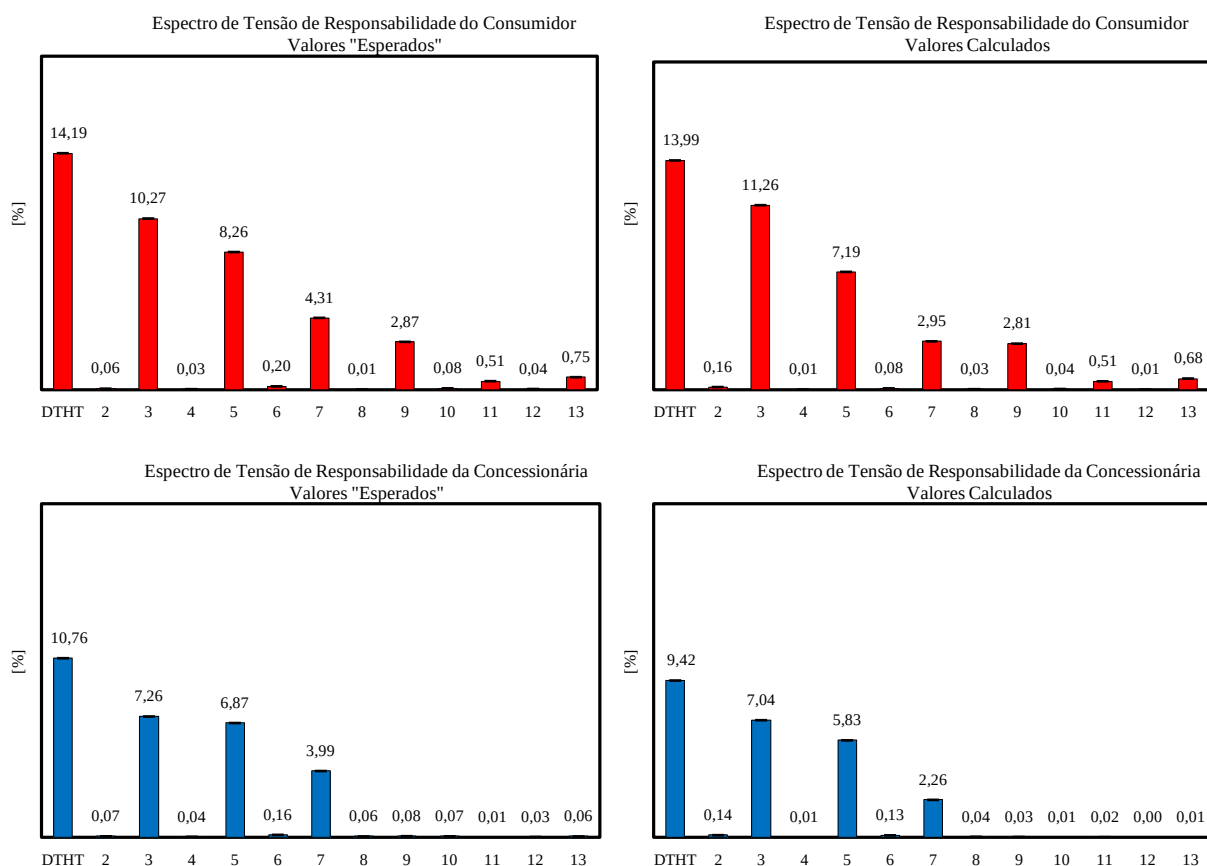


Figura 5.15 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 02.

Em complemento aos módulos indicados na figura anterior e com o intuito de melhor visualizar a composição entre as distorções provenientes do consumidor e da concessionária, a

figura 5.16 apresenta os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária para as harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados, ou seja, as ordens 3, 5 e 7.

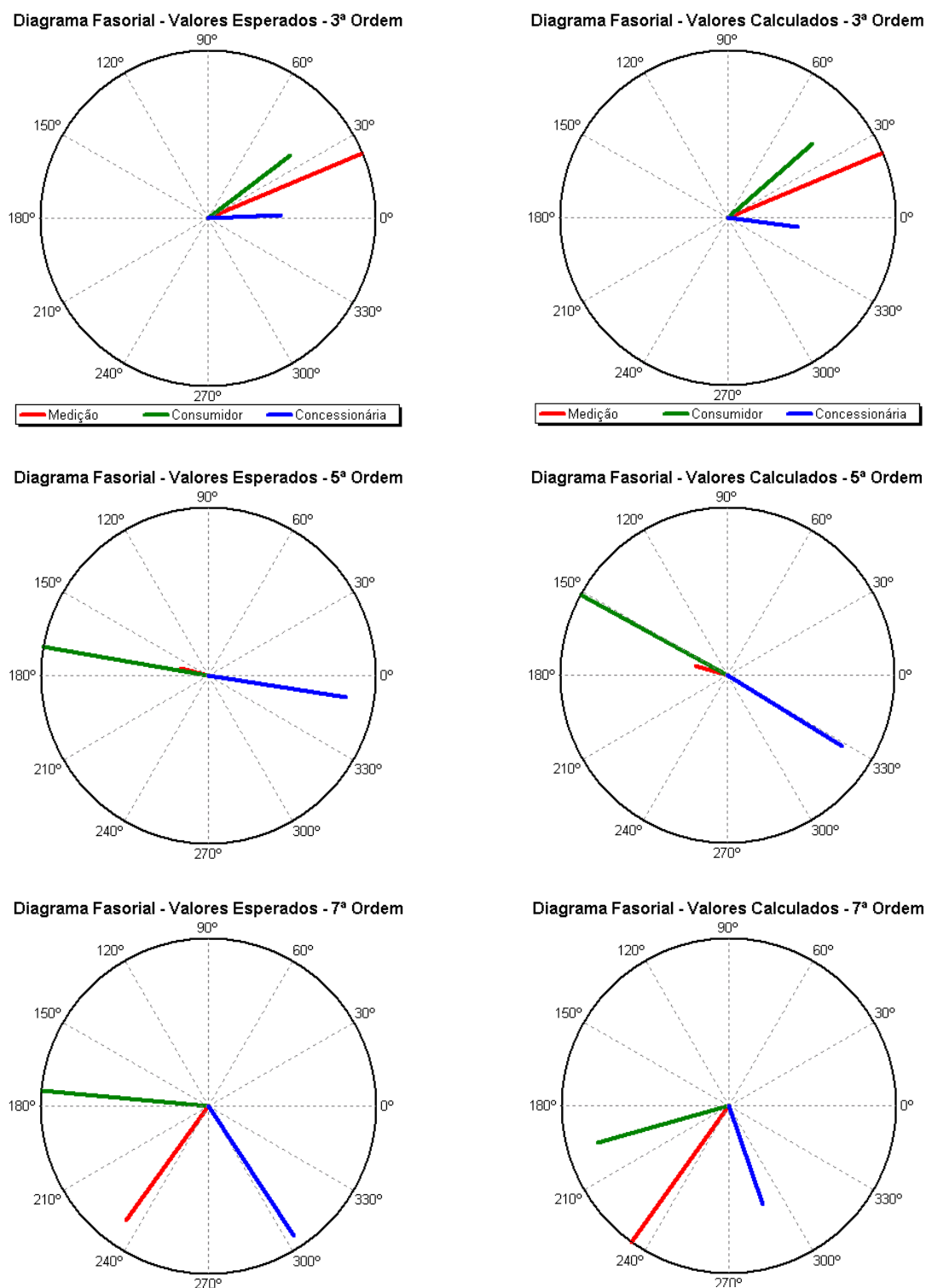


Figura 5.16 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 02.

Comentários

Os resultados evidenciam que:

- Também para este caso, a proposta de metodologia apresentou resultados satisfatórios para todas as frequências. As diferenças observadas entre os valores “esperados” e calculados não resultaram em inversão da responsabilidade sobre as distorções.
- A distorção de tensão medida para a harmônica de ordem 5, equivalente a 1,41% do valor fundamental, está em conformidade com as recomendações do ONS [3] e, devido ao baixo valor, não há razão para discussão sobre os responsáveis por esta distorção. No entanto, os valores “esperados” e calculados indicam que tanto o consumidor quanto a concessionária violam os limites recomendados (5%). Este fato é decorrente de um cancelamento entre as tensões de ambas as partes, conforme mostrado no diagrama fasorial da figura 5.15. Mesmo nestas condições, a metodologia mostrou-se condizente com os valores esperados.
- Mais uma vez, os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciaram na separação das responsabilidades quando o consumidor é o principal responsável pelas distorções, caso das ordens 9, 11 e 13.

c) Caso 03

Nesta terceira configuração, as cargas lineares e não-lineares do sistema teste continuam inalteradas enquanto que a fonte de alimentação é programada para fornecer as mesmas ordens harmônicas do caso anterior, mantendo o módulo constante e alterando somente o defasamento angular. Então, as distorções ficam assim definidas:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 6% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

O deslocamento em 180° nas tensões pré-definidas tem como objetivo avaliar a proposta de metodologia para uma condição operacional onde as distorções harmônicas, produzidas pela fonte de alimentação, encontram-se em posição inversa às aquelas configuradas para o Caso 02.

Seguindo a mesma formação utilizada no caso anterior, na sequência são apresentados os resultados, cálculos e comentários sobre esta nova condição.

Resultados experimentais

A figura 5.17 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.

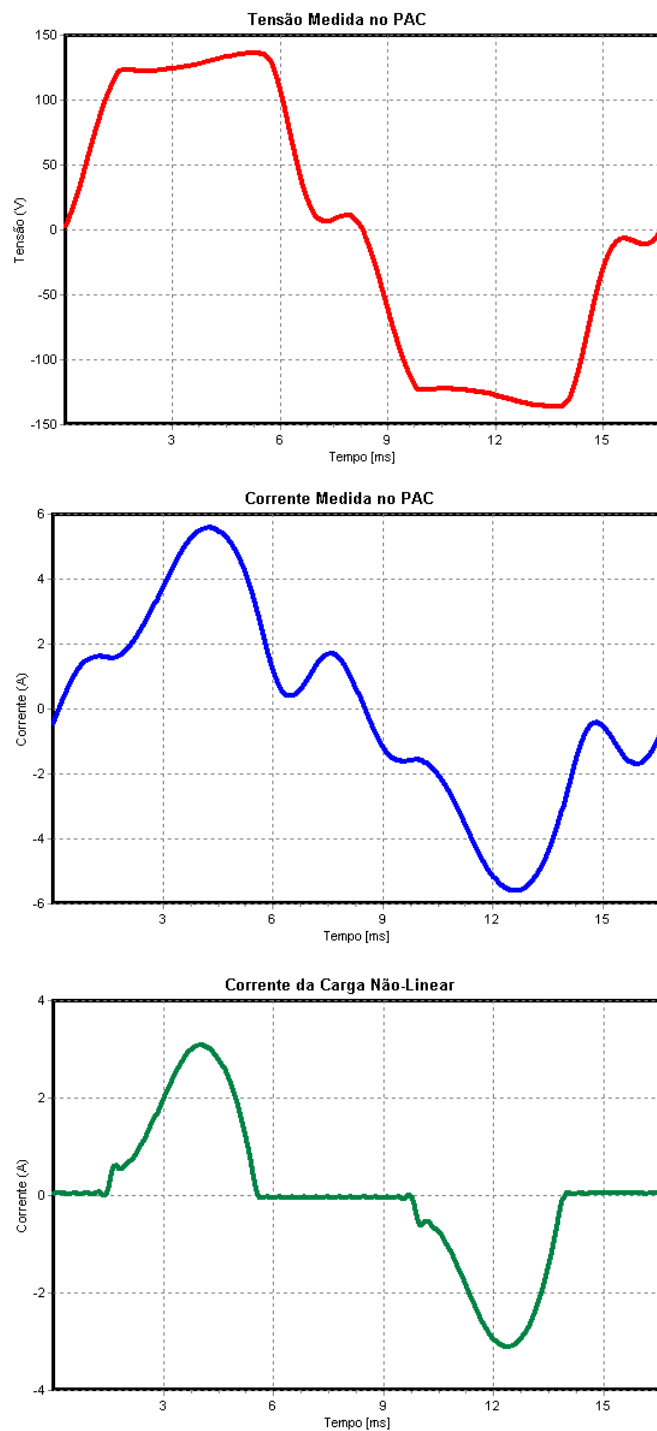


Figura 5.17 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03.

Novamente, a figura 5.18 fornece os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

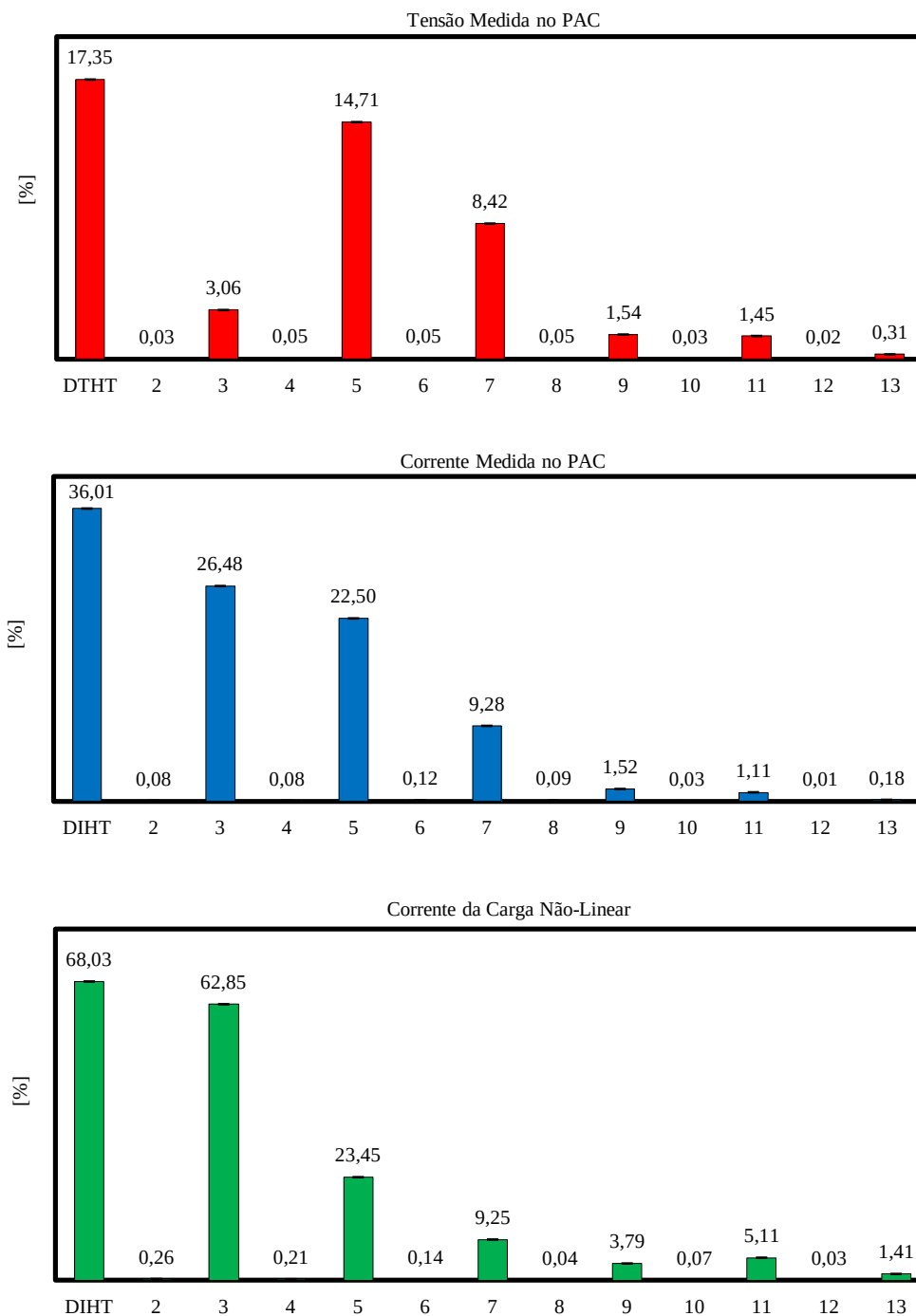


Figura 5.18 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 03.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.4 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 03.

Tabela 5.4 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 03.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
36,10	220,04	18,55

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.19.

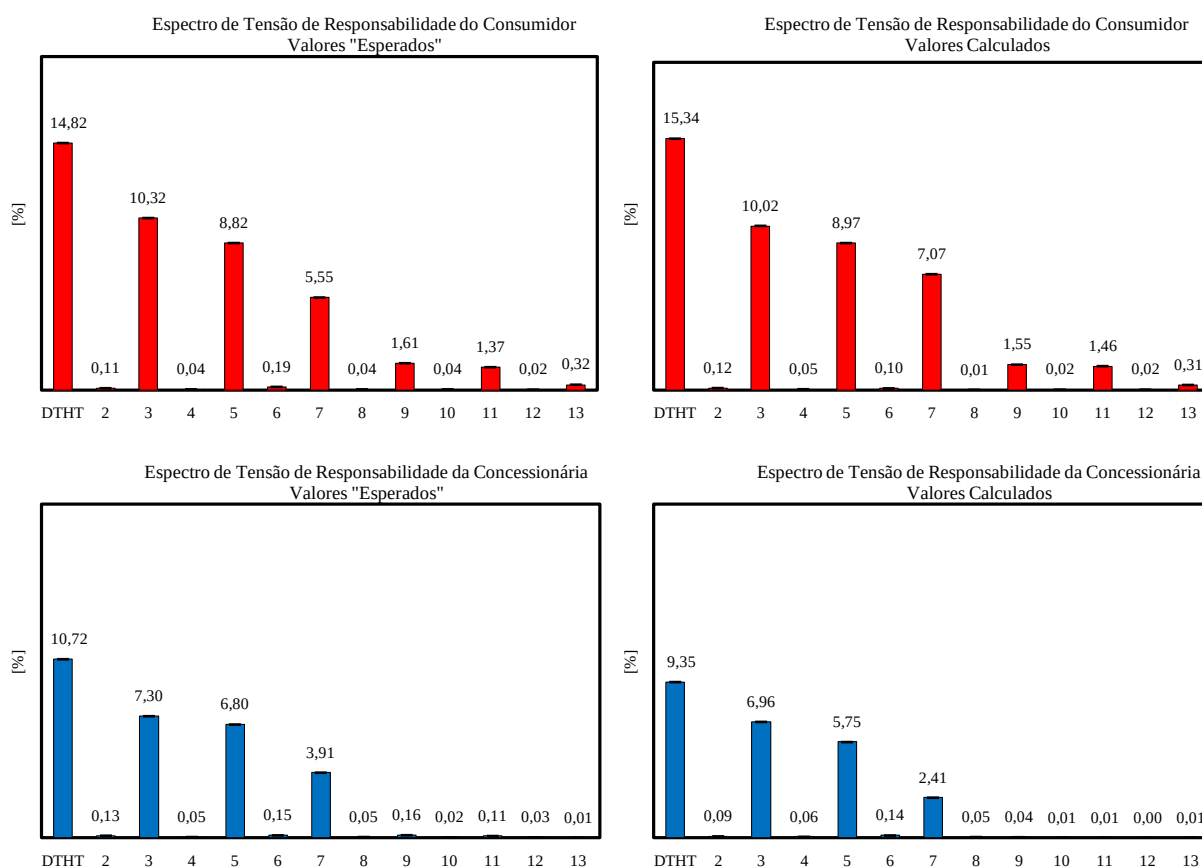


Figura 5.19 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 03.

Também para este caso, a figura 5.20 apresenta os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária para as harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados, ordens 3, 5 e 7.

Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 3ª Ordem

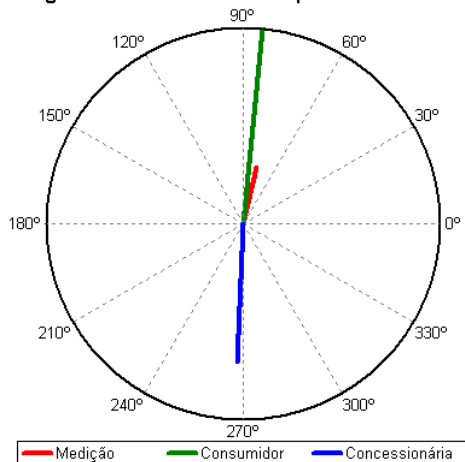


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 3ª Ordem

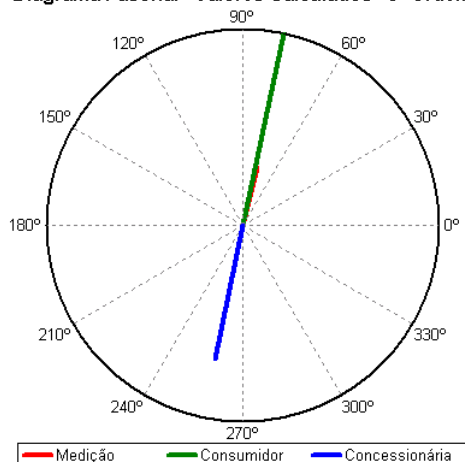


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 5ª Ordem

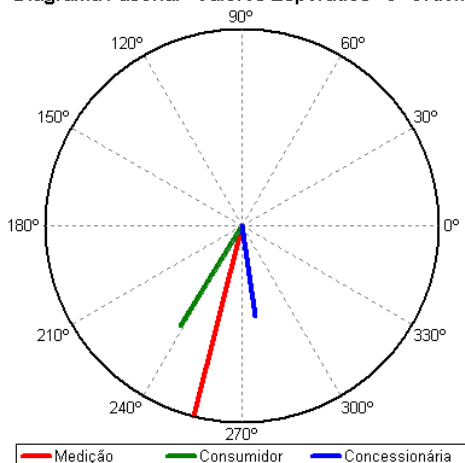


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 5ª Ordem

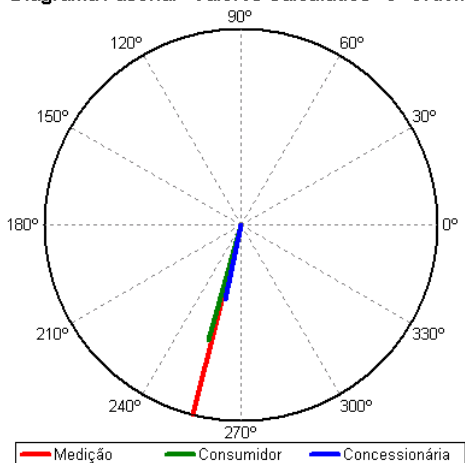


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 7ª Ordem

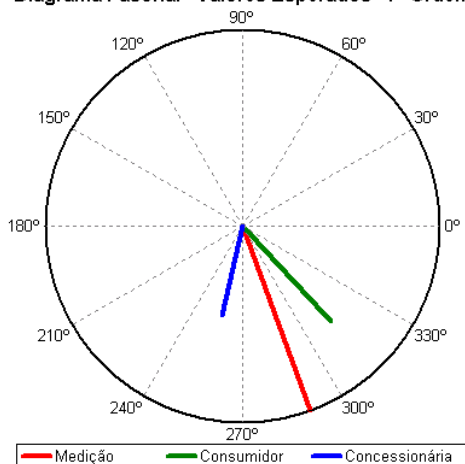


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 7ª Ordem

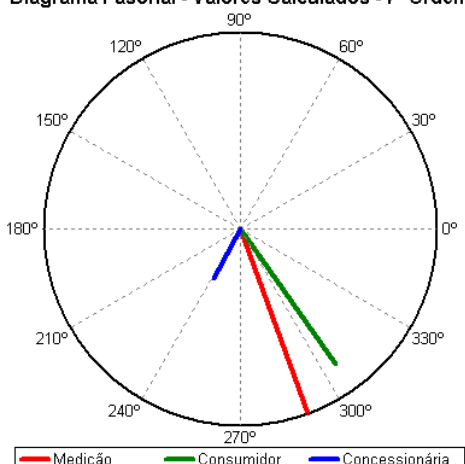


Figura 5.20 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 03.

Comentários

Os resultados evidenciam que:

- A inversão de 180° no ângulo de defasagem das distorções oriundas da concessionária não afetou o desempenho da metodologia e, mais uma vez, a proposta mostrou-se satisfatória.
- A distorção de tensão de 3ª ordem, de forma semelhante ao ocorrido para a harmônica de ordem 5 no caso anterior, não apresenta níveis superiores aos recomendados pelo ONS [3]. Mas, os valores “esperados” e calculados, indicam que tanto o consumidor quanto a concessionária violam estes limites. Novamente, este fato é decorrente do cancelamento entre as tensões de ambas as partes, conforme elucidado no diagrama fasorial da figura 5.19.
- A maior discrepância entre as distorções esperadas e as calculadas é observada para ordem 7. Este fato é justificado pela amplificação das impedâncias harmônicas do PAC nas proximidades desta ordem (ressonância paralela), conforme visualizado na figura 5.9. Assim, qualquer imprecisão, mesmo que pequena, nos parâmetros da carga equivalente da carga pode resultar em uma diferença significativa na impedância deste ponto. Apesar desta característica, não houve maiores prejuízos ao processo de separação das responsabilidades.

d) Caso 04

Neste caso as distorções harmônicas provenientes do sistema supridor são substancialmente majoradas, sem qualquer alteração nas cargas lineares e não-lineares do sistema testes. Os novos níveis das distorções harmônicas de tensão programados na fonte de alimentação são:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 16% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 13% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 8% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

O acréscimo nas distorções harmônicas presentes no PAC objetiva uma inversão das responsabilidades em comparação com os casos anteriores. Esta situação crítica também favorece mudanças significativas no comportamento da carga não-linear do consumidor, fato este não observado nos situações mostradas.

Na seqüência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 04.

Resultados experimentais

A figura 5.21 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.

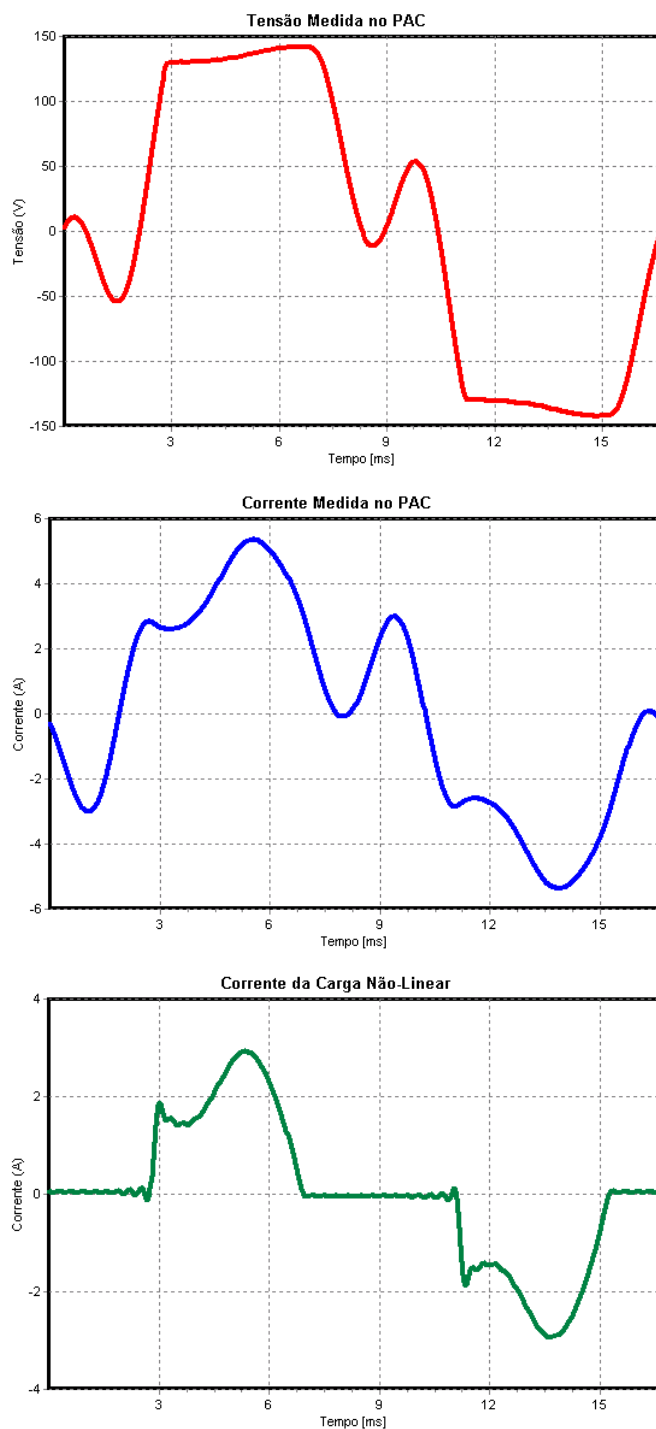


Figura 5.21 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04.

A figura 5.22 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

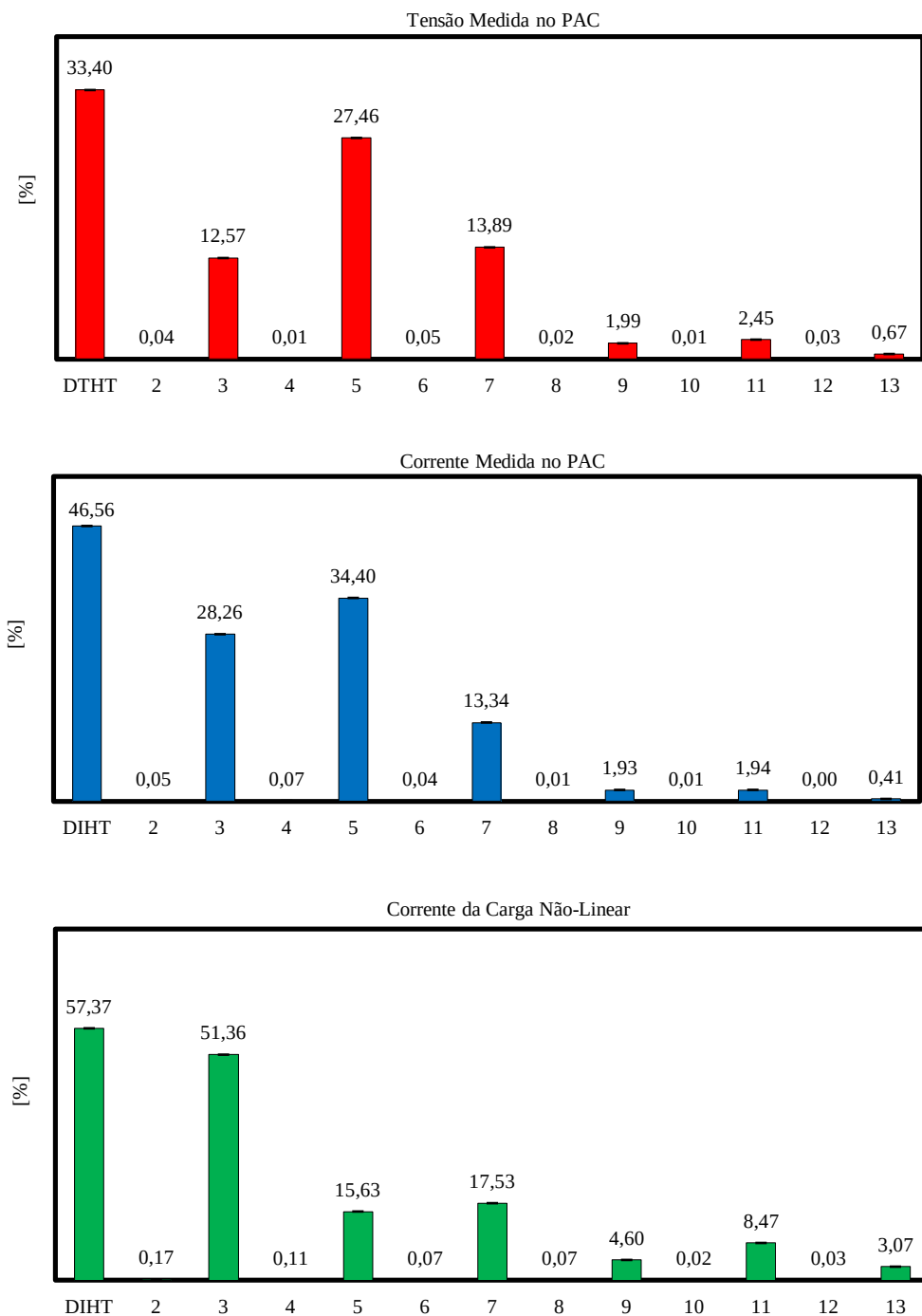


Figura 5.22 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 04.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.5 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 04.

Tabela 5.5 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 04.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
36,08	355,86	13,71

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.23.

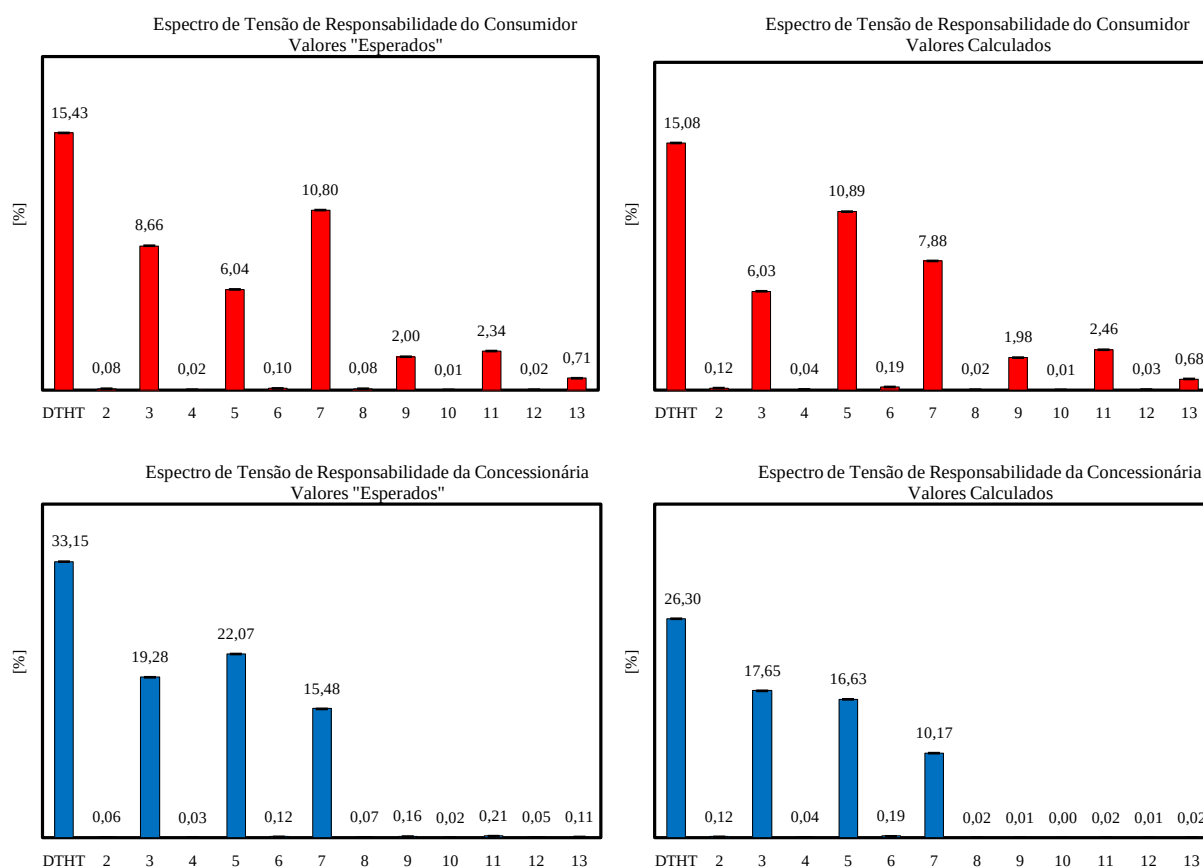


Figura 5.23 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 04.

Os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária são mostrados pela figura 5.24 para aquelas harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados (3ª, 5ª e 7ª ordens).

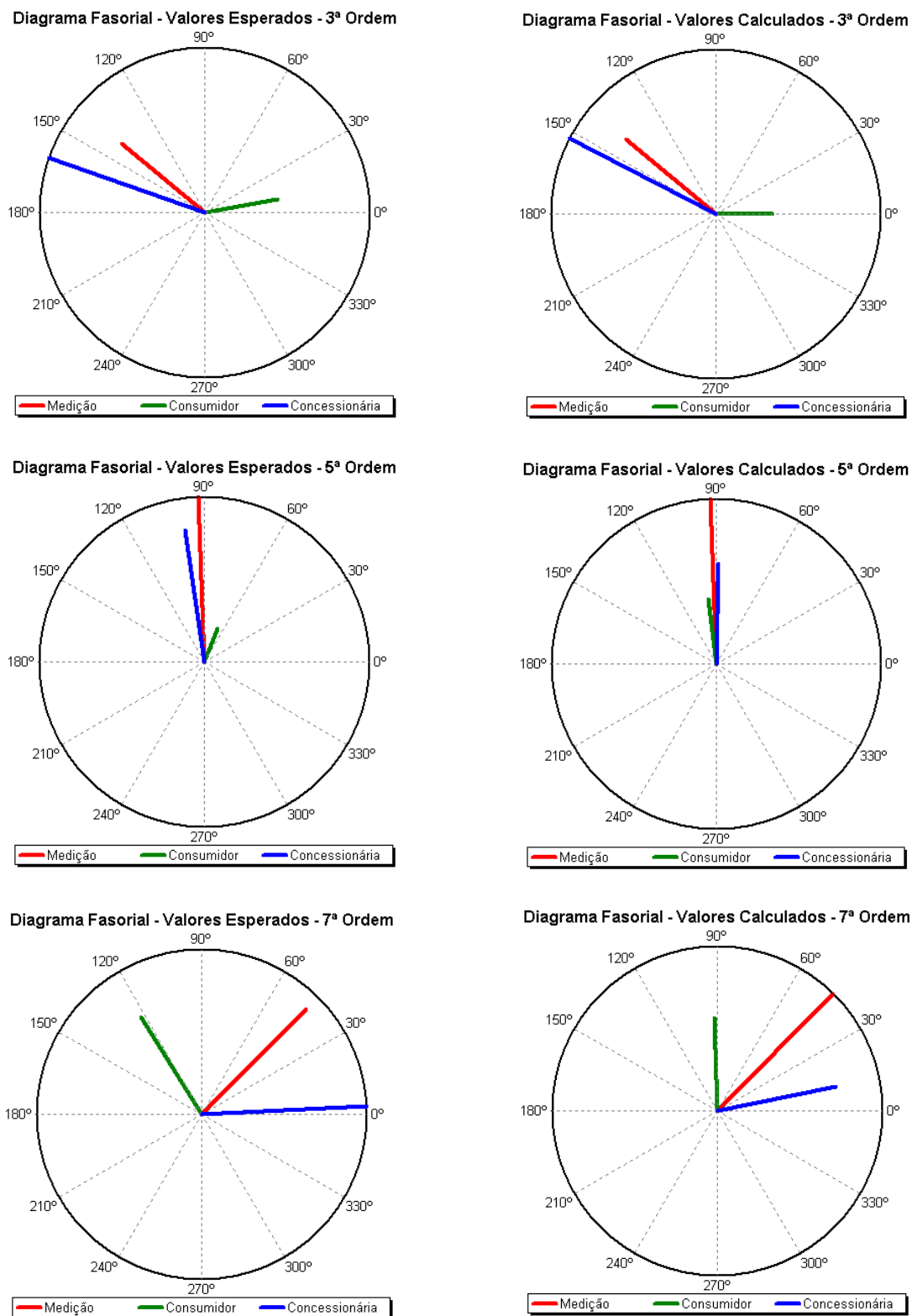


Figura 5.24 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04.

Comentários

Para este caso, os resultados permitem os seguintes comentários:

- O conteúdo elevado de distorções harmônicas oriundas da concessionária modificou substancialmente o comportamento da carga não-linear (retificador) do consumidor. Estas condições operacionais conduziram a uma redução nas correntes harmônicas de ordem 3 e 5, e um substancial acréscimo para a 7^a e 11^a ordens.
- As distorções de responsabilidade exclusiva do consumidor (9^a, 11^a e 13^a ordens) continuam com resultados satisfatórios e atestam a independência destas ordens com relação às ordens com contribuição de ambas as partes.
- Para a 3^a e 7^a ordens, apesar das diferenças registradas entre os valores calculados e os “esperados”, a relação entre estes parâmetros permite uma adequada separação das responsabilidades sobre estas distorções.
- Os valores “esperados” para a harmônica de ordem 5 indicam uma diferença de aproximadamente 15,97% entre a concessionária e o consumidor (22,04 e 6,07% respectivamente). Esta diferença é de 5,74% para os valores calculados (16,63% e 10,89%, respectivamente). Não obstante a esta observação, a responsabilidade sobre as distorções desta ordem continua clara.

e) Caso 05

Seguindo o mesmo procedimento adotado para os casos iniciais, o Caso 05 é semelhante ao Caso 04 com relação ao módulo das distorções presentes no sistema supridor, sendo alterada a defasagem angular das harmônicas consideradas.

Assim, a configuração da fonte de tensão segue os seguintes parâmetros:

- 3ª ordem (180 Hz):

Magnitude = 16% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 5ª ordem (300 Hz):

Magnitude = 13% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 8% do valor fundamental;

Defasagem angular = 180° em relação à tensão fundamental.

Na sequência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 05.

Resultados experimentais

A figura 5.25 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum assim como a corrente medida no ramo do retificador.

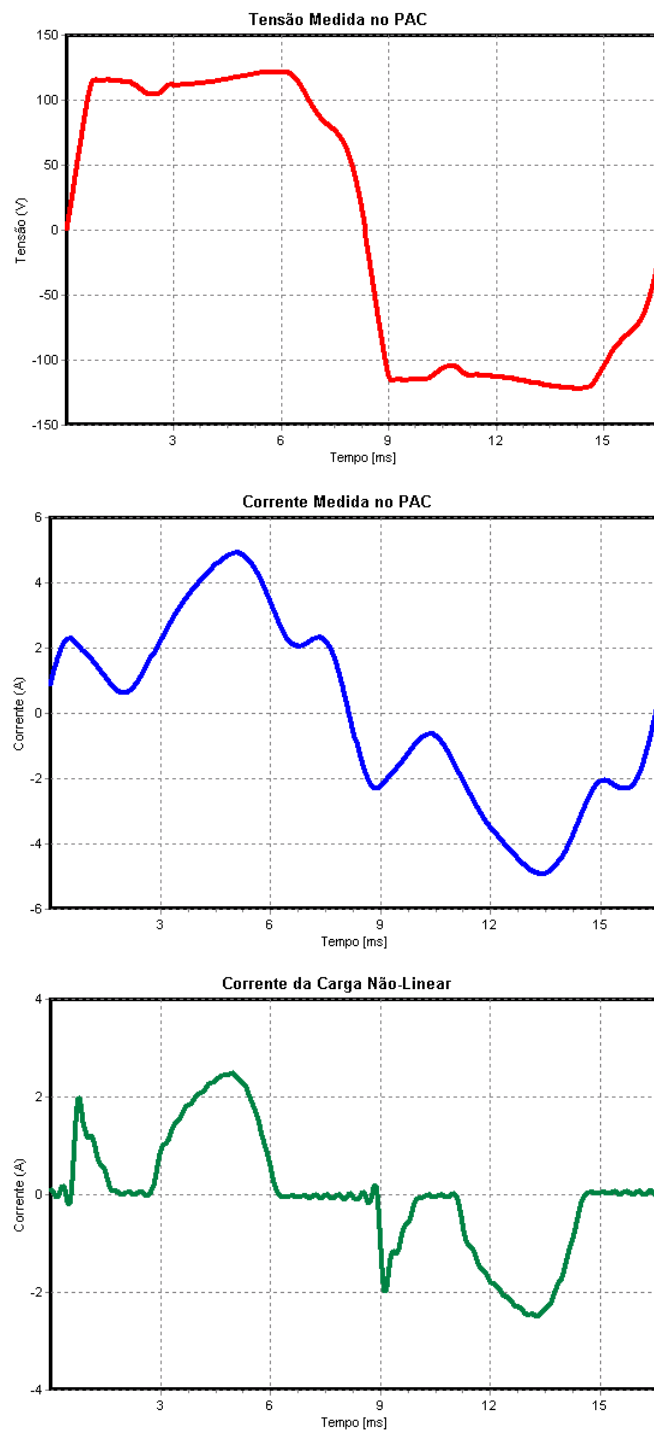


Figura 5.25 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05.

A figura 5.26 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

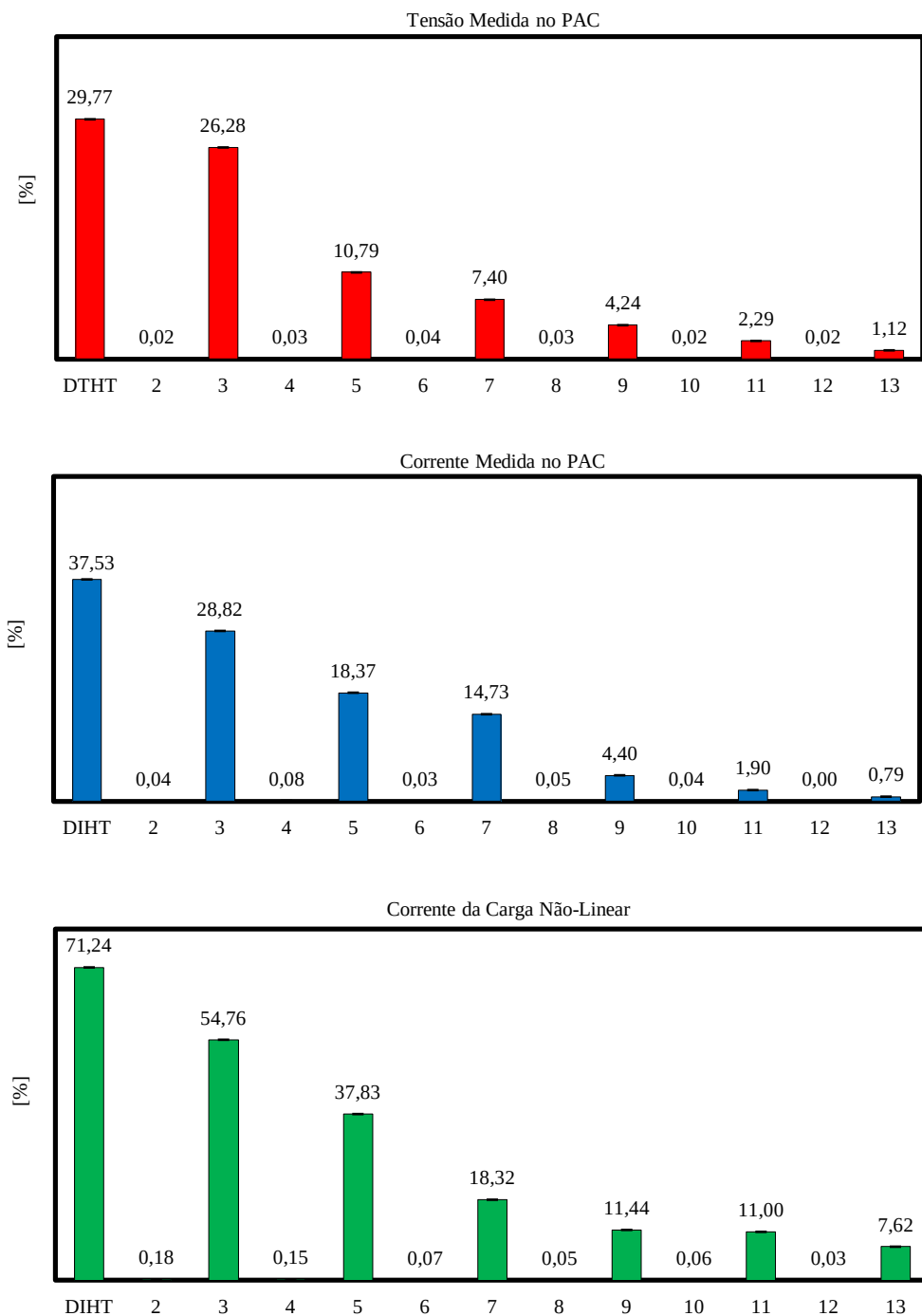


Figura 5.26 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC e da corrente no ramo da carga não-linear – Caso 05.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.6 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 05.

Tabela 5.6 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 05.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
39,97	240,86	16,97

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.27.

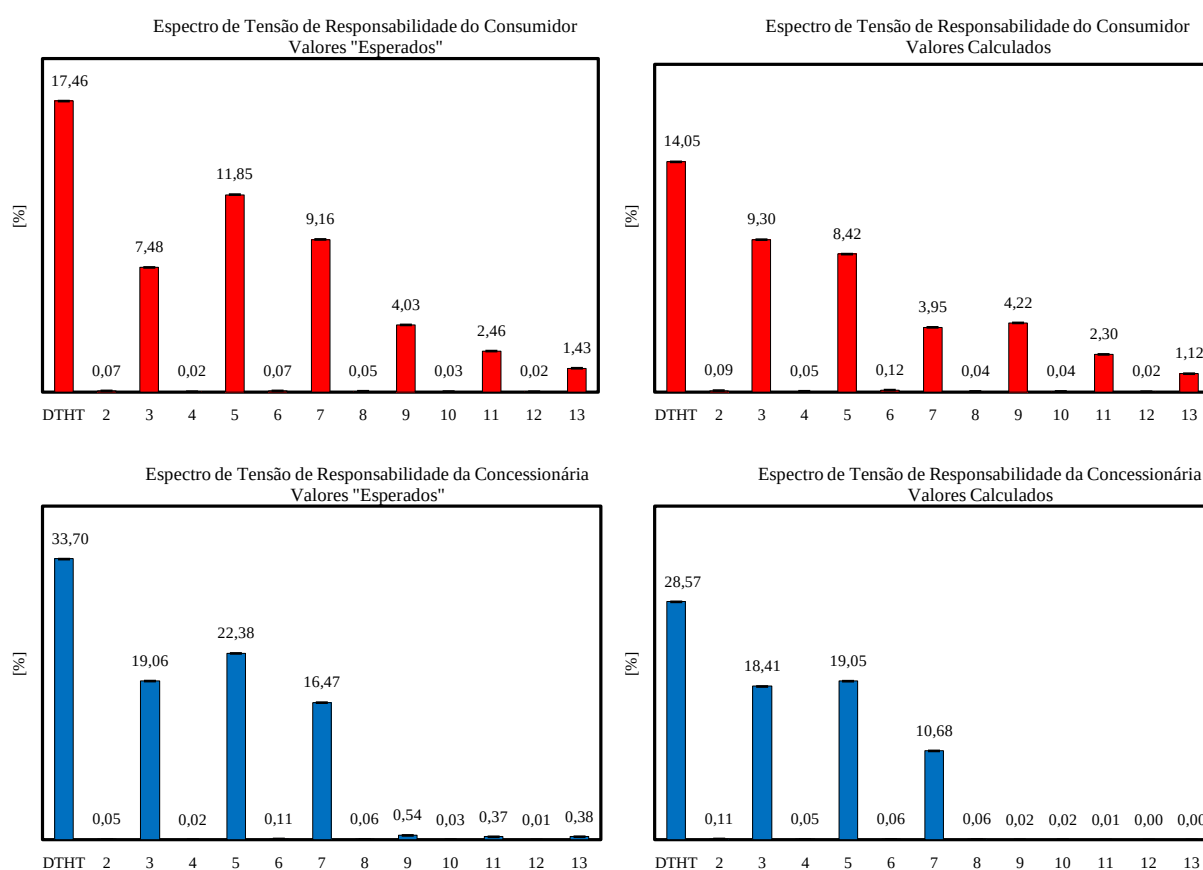


Figura 5.27 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 05.

Os fasores referentes às tensões medidas e àquelas de responsabilidade do consumidor e da concessionária são mostrados pela figura 5.28 para aquelas harmônicas cujas distorções são provenientes de ambos os lados (3ª, 5ª e 7ª ordens).

Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 3ª Ordem

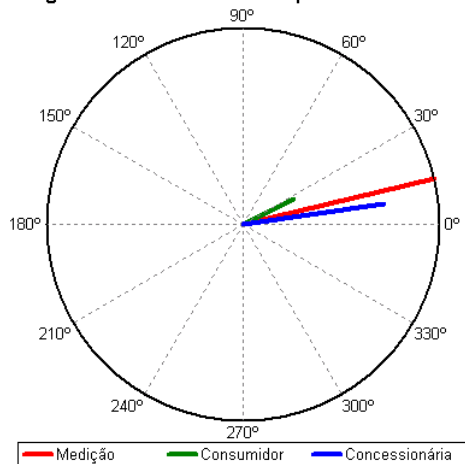


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 3ª Ordem

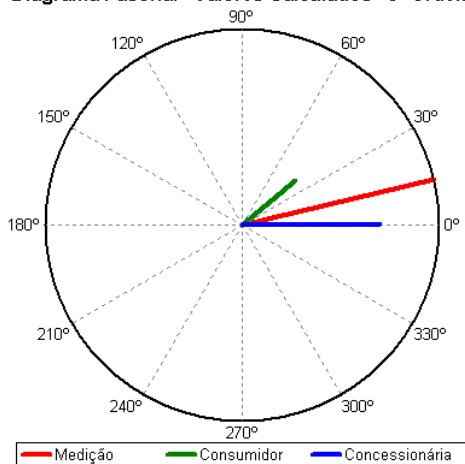


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 5ª Ordem

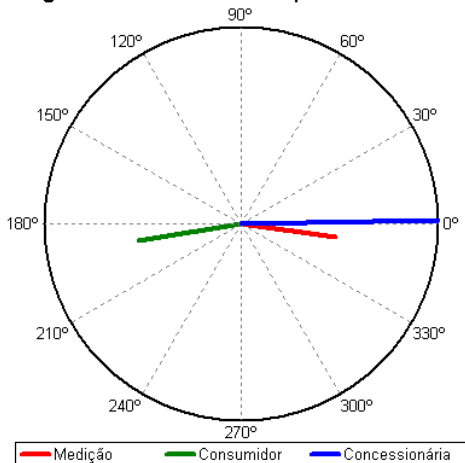


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 5ª Ordem

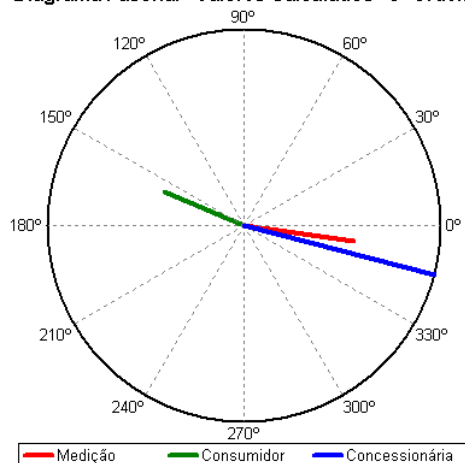


Diagrama Fasorial - Valores Esperados - 7ª Ordem

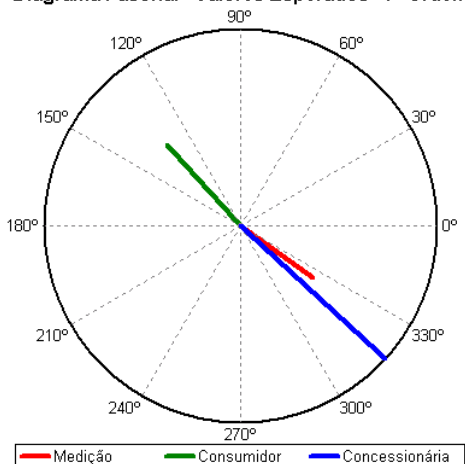


Diagrama Fasorial - Valores Calculados - 7ª Ordem

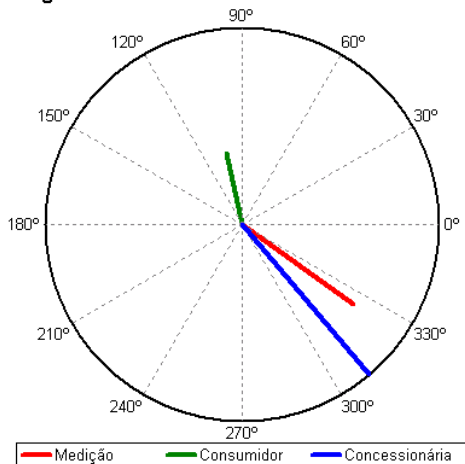


Figura 5.28 – Diagramas fasoriais das tensões harmônicas medidas, calculadas e esperadas para as ordens 3, 5 e 7 – Caso 04.

Comentários

- A forma de onda da corrente do retificador é bastante diferente daquelas observadas nos casos anteriores, evidenciando o efeito das elevadas distorções da rede de suprimento. Com exceção da 3ª ordem, todas as demais foram majoradas. Esta condição operacional conduz a um acréscimo nas distorções de responsabilidade do consumidor. Portanto, situações adversas de suprimento podem aumentar a geração de correntes harmônicas por parte das cargas não-lineares do consumidor, agravando a situação inicial.
- Diferentemente do caso anterior, apesar das diferenças entre os valores “esperados” e calculados, a relação entre estes parâmetros permite uma adequada separação das responsabilidades sobre todas as distorções presentes no espectro de tensão.

f) Caso 06

Com o intuito de verificar a resposta da metodologia de separação das responsabilidades quando somente o supridor possuir distorções harmônicas, surge o presente caso. Esta situação determina a ausência de cargas não-lineares nas instalações do consumidor, portanto, o retificador do sistema teste é desconectado. As distorções harmônicas contidas na fonte de alimentação possuem a seguinte configuração:

- 3ª ordem (180 Hz):
Magnitude = 6% do valor fundamental;
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.
- 5ª ordem (300 Hz):
Magnitude = 4% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

- 7ª ordem (420 Hz):

Magnitude = 2% do valor fundamental;

Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

Na sequência são apresentados os resultados, cálculos e comentários para o Caso 06.

Resultados experimentais

A figura 5.29 apresenta, respectivamente, as tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento comum.

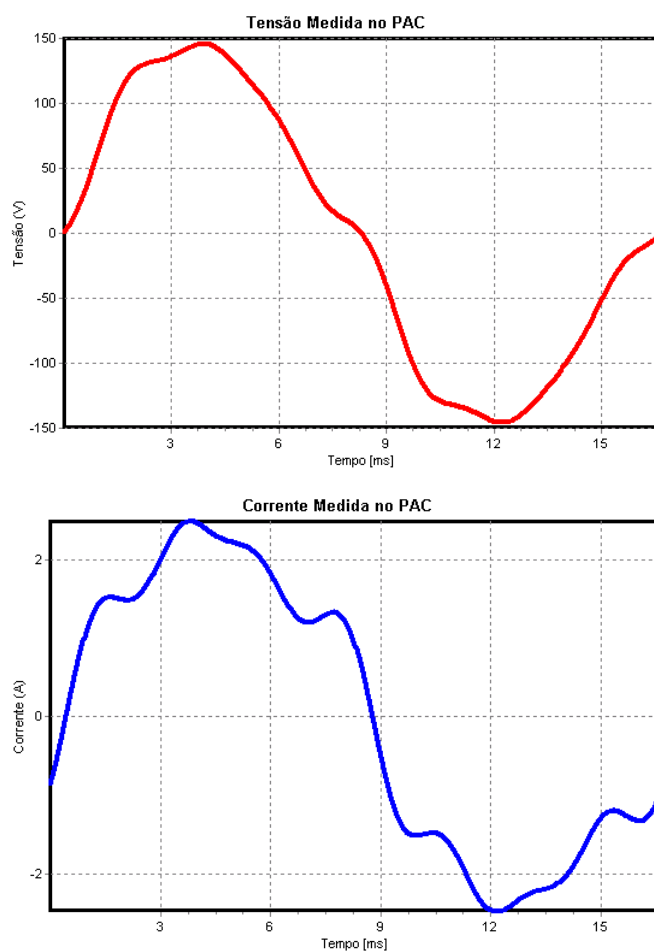


Figura 5.29 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06.

A figura 5.30 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

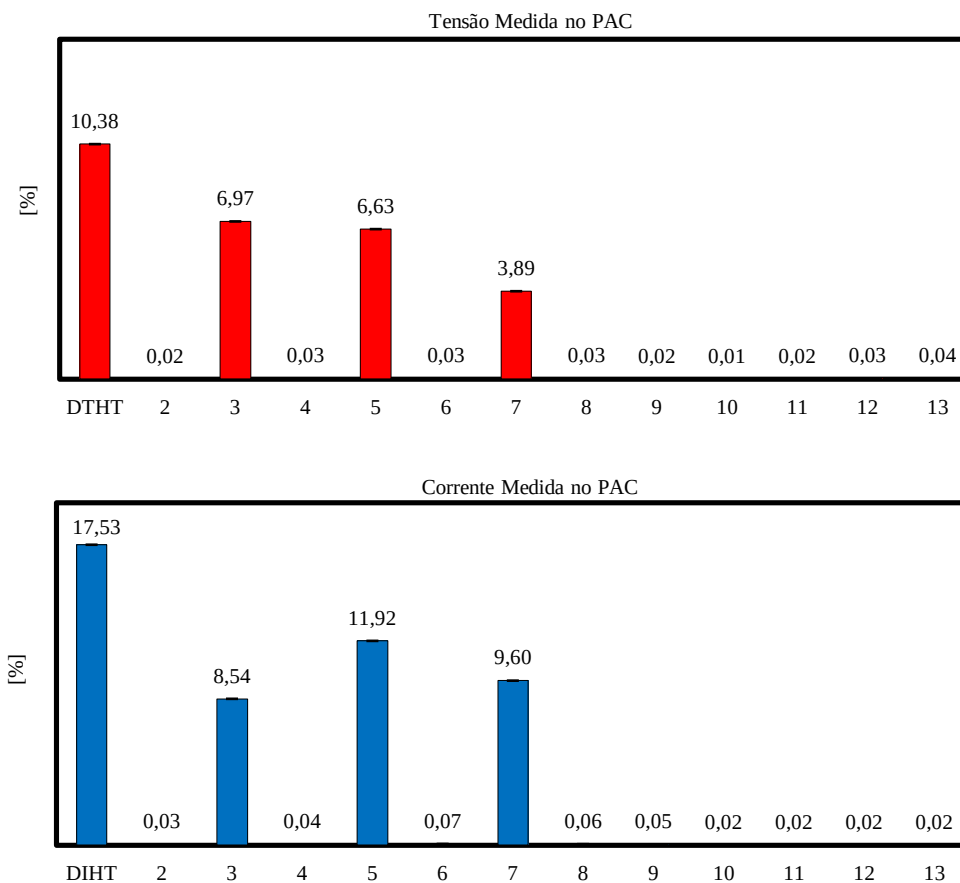


Figura 5.30 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 06.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.7 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 06.

Tabela 5.7 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 06.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
61,46	274,03	13,65

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.31.

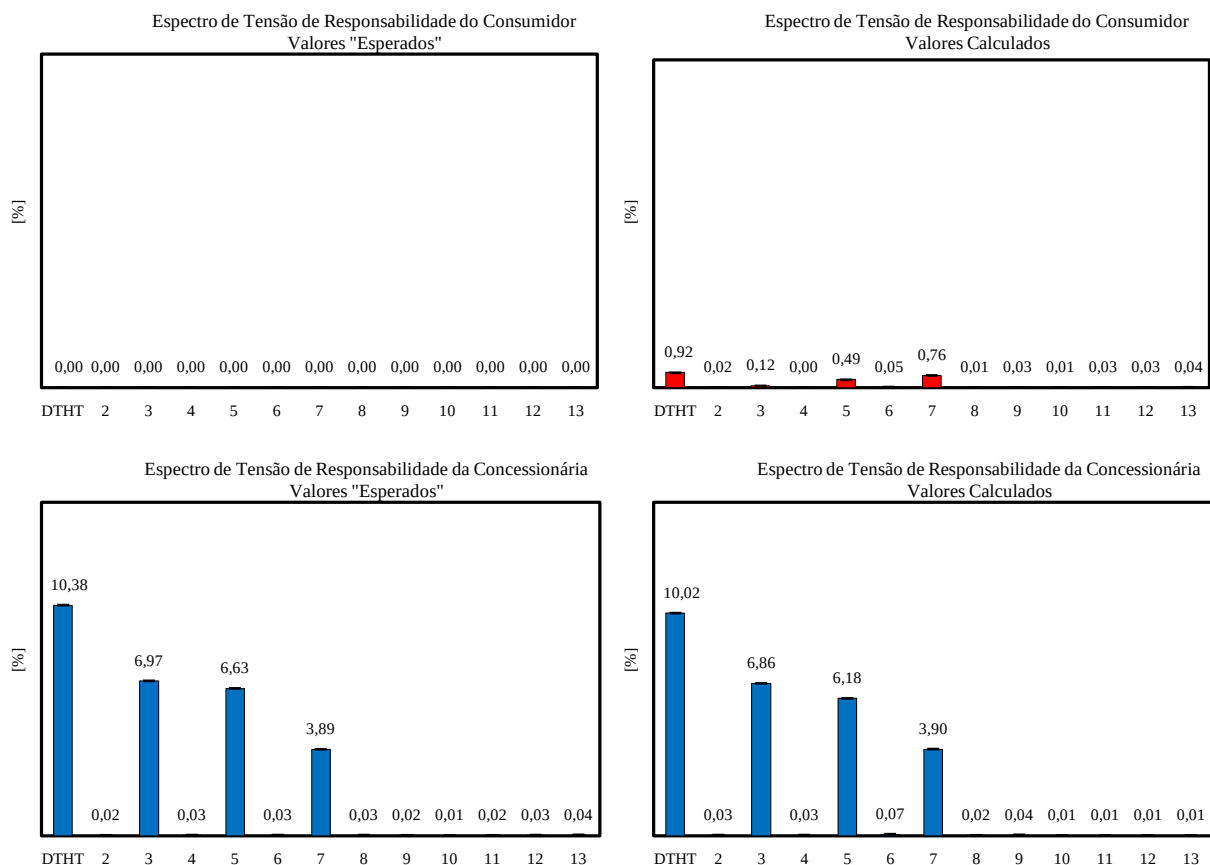


Figura 5.31 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 06.

Comentário:

- De acordo com os resultados apresentados a proposta de metodologia de separação das distorções harmônicas é adequada à identificação do responsável quando a fonte das mesmas é exclusiva do sistema supridor.

g) Caso 07

Por fim, de forma a manter a sequência de estudos de casos apresentada, o Caso 07 é semelhante ao anterior quanto à instalação do consumidor, ou seja, somente cargas lineares. Quanto à fonte de alimentação, as distorções utilizam os mesmos patamares dos Casos 03 e 04, conforme descrito na sequência:

- 3ª ordem (180 Hz):
Magnitude = 16% do valor fundamental;
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.
- 5ª ordem (300 Hz):
Magnitude = 13% do valor fundamental;
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.
- 7ª ordem (420 Hz):
Magnitude = 8% do valor fundamental;
Defasagem angular = 0° em relação à tensão fundamental.

Resultados experimentais

A figura 5.32 apresenta os parâmetros medidos no ponto de acoplamento comum.

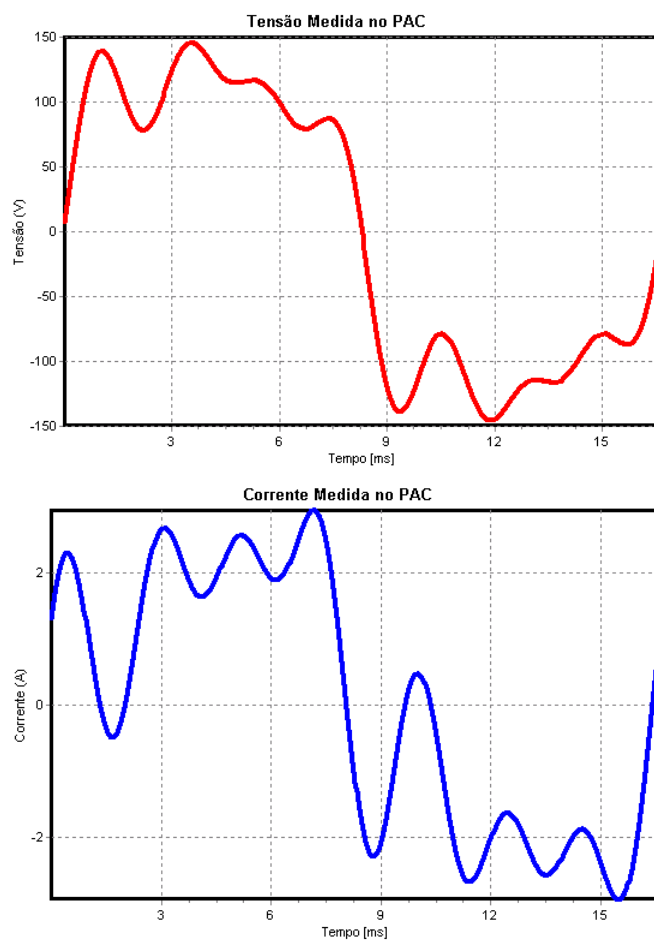


Figura 5.32 – Formas de onda da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07.

A figura 5.33 apresenta os espectros de frequência correspondentes aos sinais anteriores.

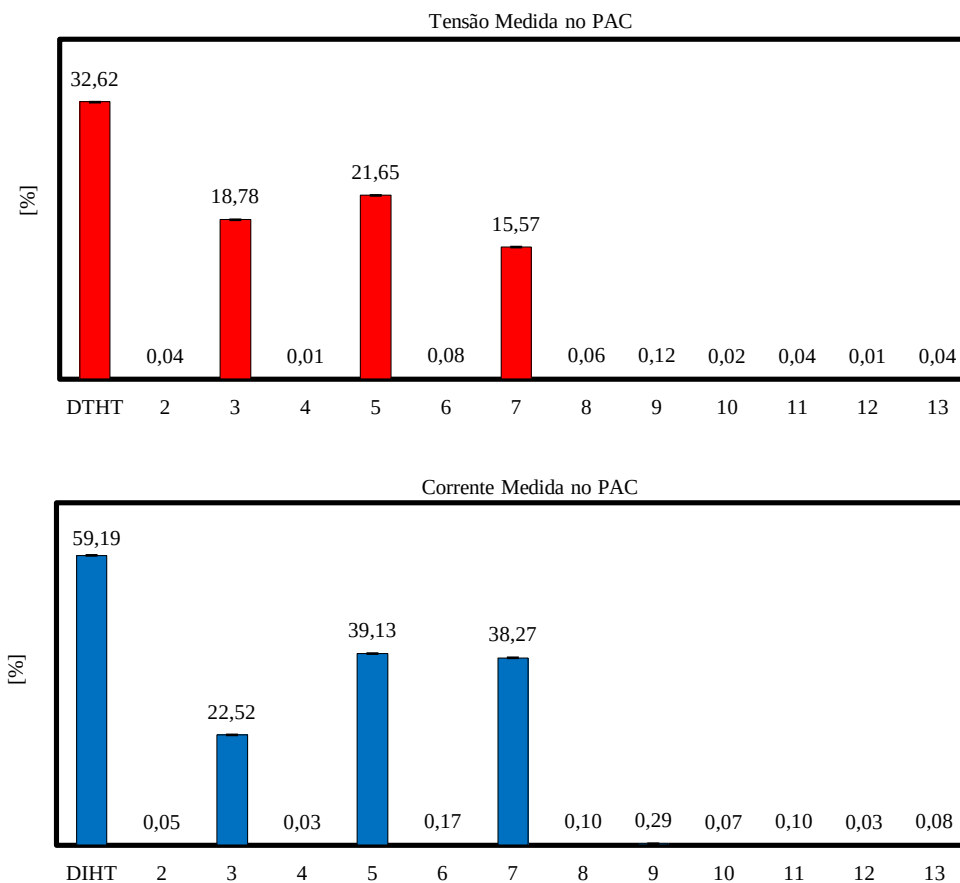


Figura 5.33 – Espectros harmônicos da tensão e da corrente medida no PAC – Caso 07.

Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções

A tabela 5.8 apresenta os parâmetros equivalentes da carga do consumidor calculados para o Caso 07.

Tabela 5.8 – Parâmetros equivalentes do consumidor – Caso 07.

R [Ω]	L [mH]	C [μF]
61,63	270,39	13,95

Os espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para o consumidor e a concessionária são indicados na figura 5.34.

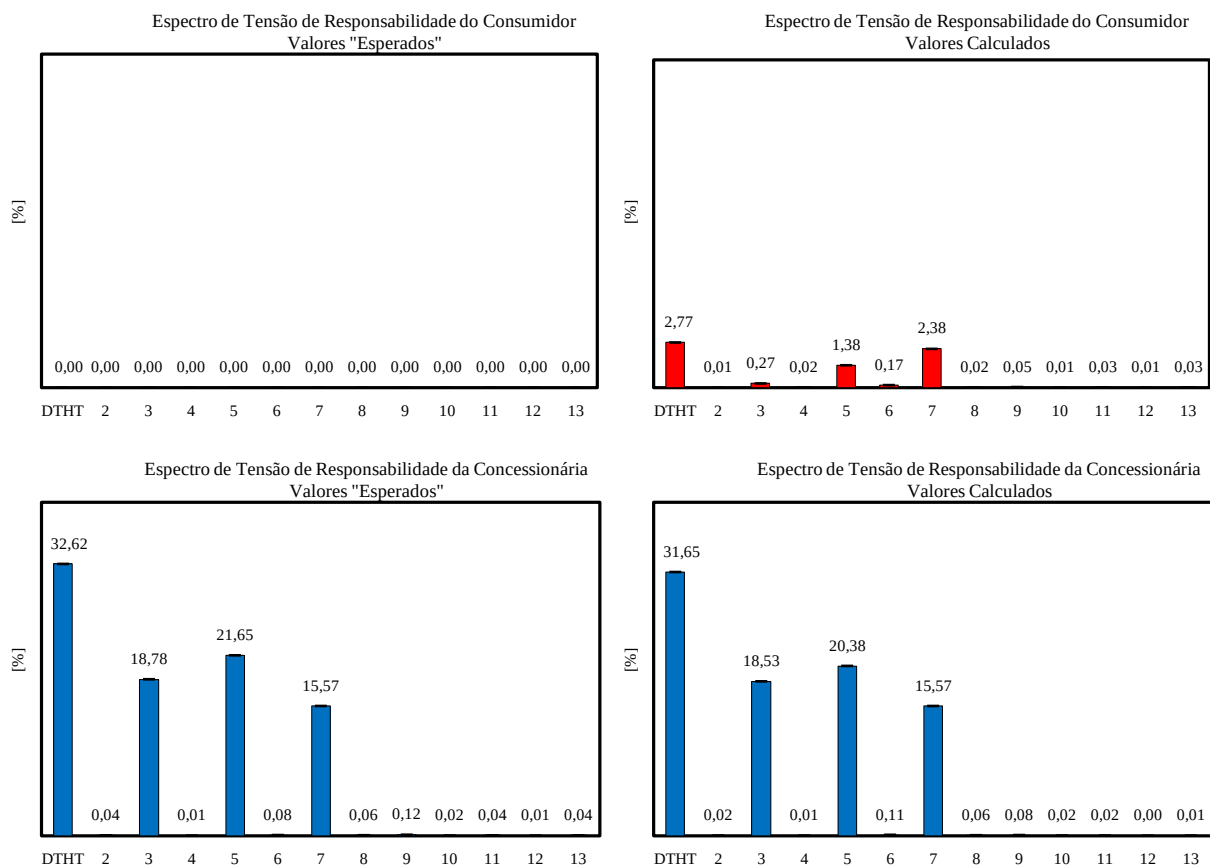


Figura 5.34 – Espectros harmônicos de tensão “esperados” e calculados para a concessionária e o consumidor – Caso 07.

Comentário:

- Não obstante aos valores calculados para as distorções do consumidor, a eficácia da metodologia é notória e corrobora os resultados e comentários do caso anterior, confirmando a aplicabilidade da proposta a sistemas cuja fonte de suprimento seja dominante quanto às distorções harmônicas.

5.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM UM SISTEMA REAL

Prosseguindo com o processo de avaliação do desempenho da metodologia proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, em complemento às análises laboratoriais, procedeu-se, nesta etapa, à aplicação da proposta para um sistema elétrico real.

Em se tratando de um sistema real, vale ressaltar que, diferentemente da situação encontrada nos ensaios laboratoriais, não há facilidades que permitam a identificação dos valores exatos para fins de comparação com aqueles advindos do método. Em síntese, para a situação em pauta, não há meios para uma estimativa precisa dos valores esperados para as distorções harmônicas relativas ao consumidor e ao concessionário. Portanto, a verificação da consistência dos resultados é fundamentada no conhecimento das características operacionais inerentes ao consumidor, como seria, por exemplo, o caso de uma carga predominantemente caracterizada por retificadores de 12 pulsos, para a qual há de se esperar que as distorções harmônicas de ordem 11 e 13 estejam, prioritariamente, atreladas com o consumo e não como o fornecimento de energia. Alternativamente, caso haja nas vizinhanças cargas reconhecidamente geradores de frequências harmônicas conhecidas, é de se esperar que estas possam ser dominantes no processo e, se este for o caso, as distorções estariam relacionadas com o suprimento.

Não obstante às dificuldades ressaltadas e outras, os trabalhos a seguir descritos encontram-se correlacionados com um complexo elétrico de grande porte (demanda superior a 500 MW), contendo cargas não-lineares (retificadores) e conectado à rede básica em 230 kV.

a) Diagrama unifilar simplificado

A figura 5.35 apresenta o diagrama unifilar simplificado da instalação real, de grande porte, utilizada para a aplicação da metodologia de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

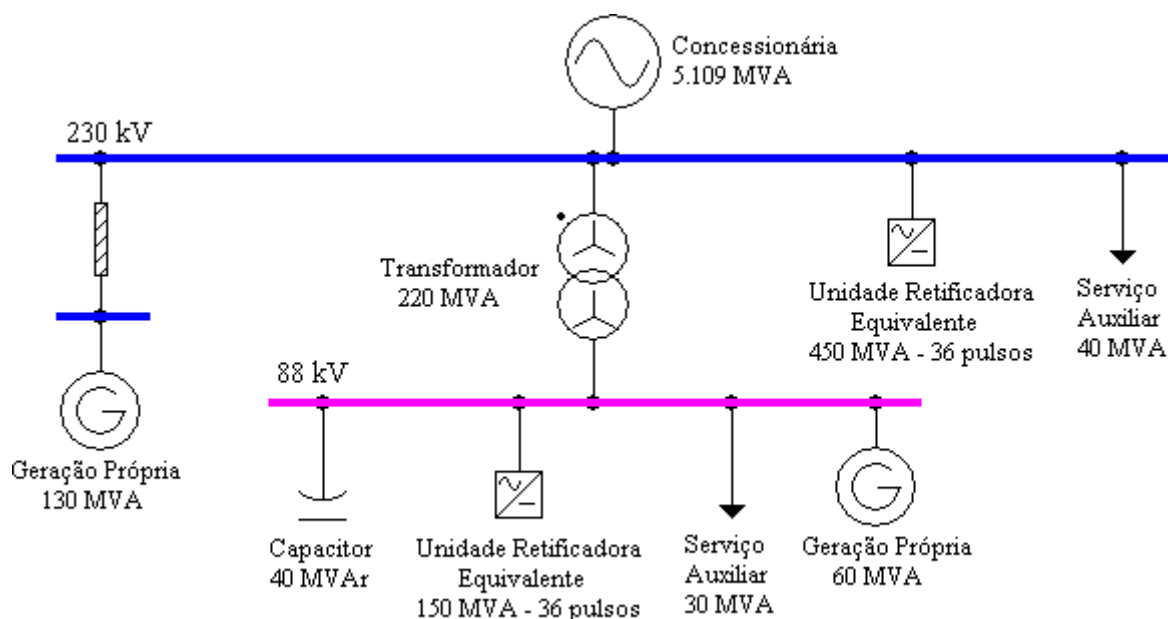


Figura 5.35 – Diagrama unifilar simplificado do complexo elétrico escolhido.

Os retificadores indicados na figura acima correspondem a conjuntos de retificadores formando arranjos de 36 ou 48 pulsos. Com exceção de um conjunto de retificação, todos os demais possuem filtros harmônicos para a compensação das distorções harmônicas.

b) Impedância Harmônica da Concessionária

Como destacado ao longo desta tese, o conhecimento da impedância harmônica da rede de suprimento da concessionária é imprescindível para a aplicação da metodologia de separação das distorções harmônicas. Como o complexo industrial analisado está conectado à rede básica, as impedâncias harmônicas do PAC, fornecidas pela concessionária, foram obtidas através do HARMZS [40] utilizando as bases para carga pesada de junho de 2007 do

Programa de Análises de Rede (ANAREDE) [41]. As figuras 5.36 e 5.37 apresentam as variações em frequência do módulo e ângulo destas impedâncias harmônicas.

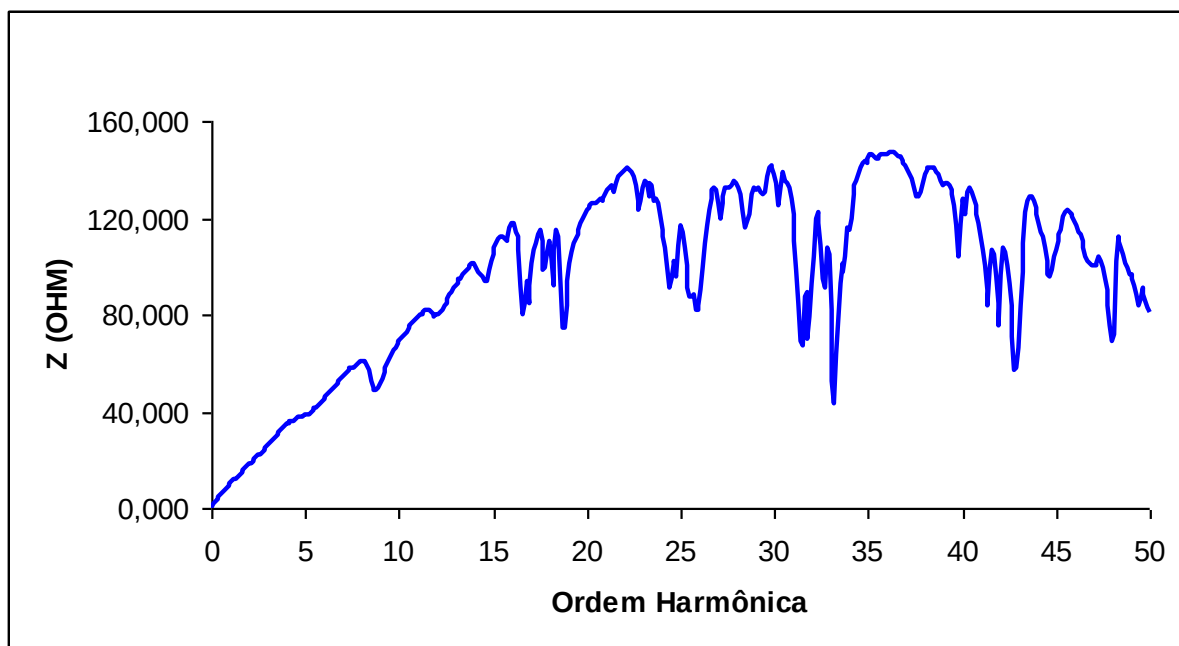


Figura 5.36 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Módulo.

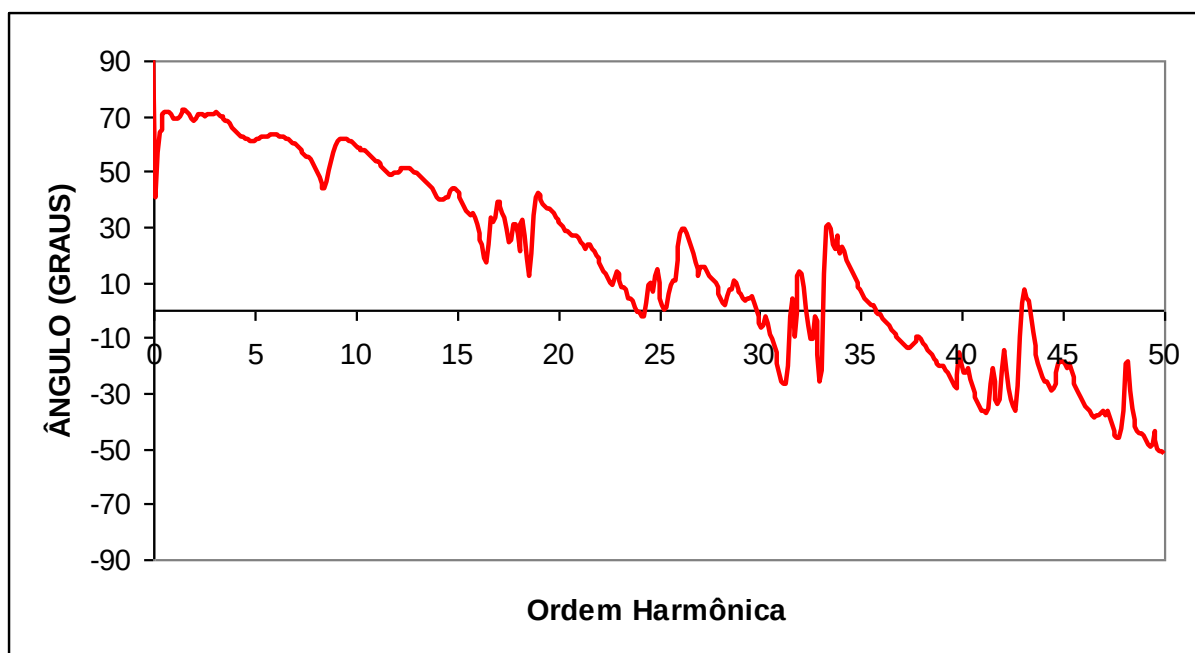


Figura 5.37 – Impedâncias harmônicas junto ao PAC - Ângulo.

Conforme se observa nas figuras, as informações relativas às impedâncias e ângulos para as distintas frequências harmônicas são determinadas para uma única fase, sendo os resultados utilizados para as demais.

c) Distorções Harmônicas Medidas no PAC

Muito embora as medições de distorções harmônicas realizadas junto ao PAC compreenderam períodos mais longos, para fins da elucidação do método, apenas um intervalo de tempo equivalente a 5 minutos de registros foi empregado para a aplicação do processo da atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas. Neste intervalo há uma garantia do funcionamento do sistema elétrico com todos os componentes indicados na figura 5.35 em operação.

A seguir apresenta-se o perfil das distorções harmônicas individuais de tensão e corrente para as harmônicas correspondentes às ordens 3, 5 e 7. Estas frequências, em conjunto com a distorção harmônica total, serão focadas no processo analítico em discussão.

Distorção Harmônica Total de Tensão

A figura 5.38 mostra o perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro durante o intervalo de tempo empregado. As grandezas referem-se ao PAC em 230 kV.

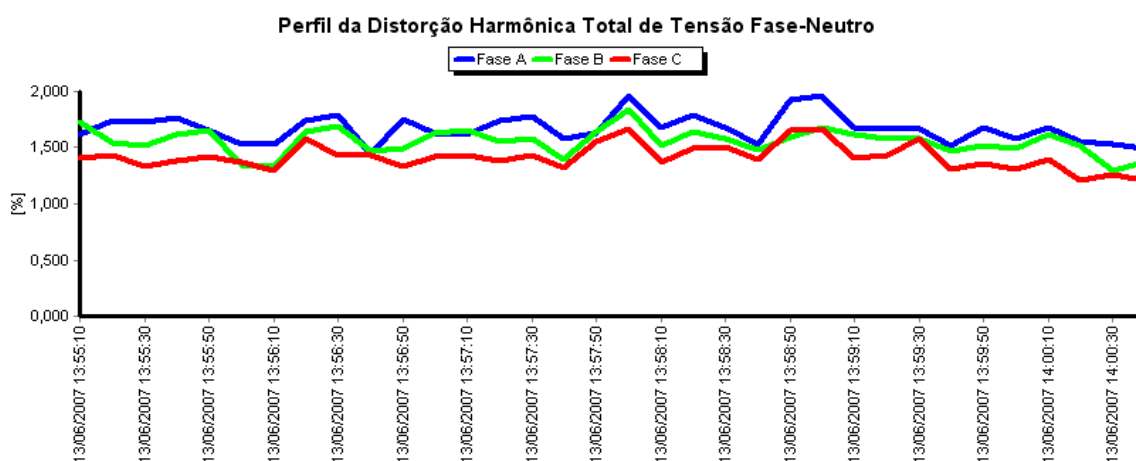


Figura 5.38 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão.

Os resultados para as distorções harmônicas totais de tensão, uma vez tratados segundo procedimentos clássicos da estatística, conduzem aos valores indicativos da tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões em % da fundamental.

Fase	Mín.	Méd.	Máx.	P95
A	1,44	1,67	1,97	1,94
B	1,29	1,56	1,84	1,70
C	1,21	1,42	1,67	1,66

Distorção Harmônica Total de Corrente

A figura 5.39 mostra o perfil das distorções harmônicas totais das correntes no mesmo ponto, ou seja, no PAC.

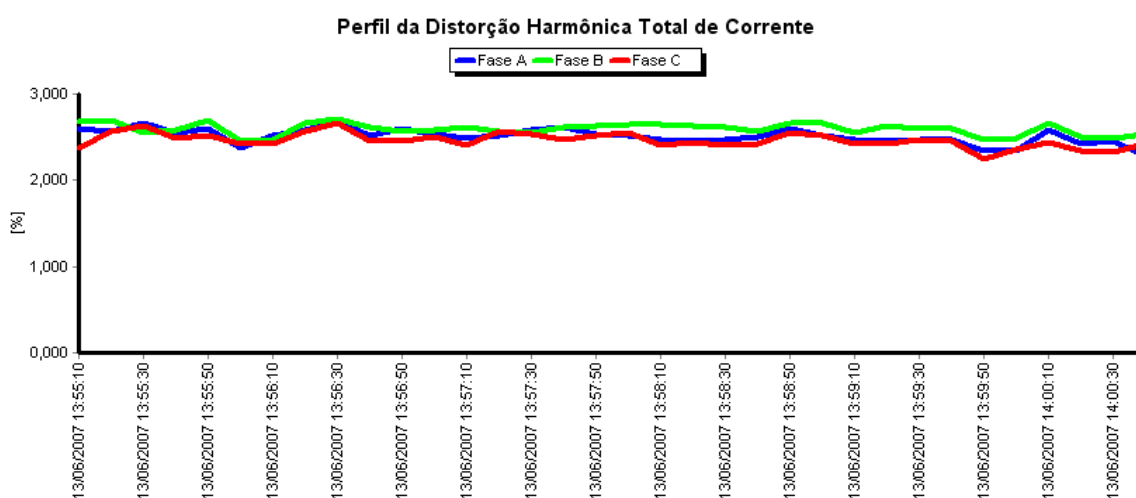


Figura 5.39 – Perfil das distorções harmônicas totais de corrente.

A tabela 5.10 evidencia os valores estatísticos concernentes às distorções harmônicas totais das correntes.

Tabela 5.10 – Valores estatísticos das distorções totais das correntes em % da fundamental.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	2,28	2,51	2,68	2,63
B	2,46	2,59	2,71	2,69
C	2,25	2,46	2,66	2,59

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão

Complementarmente, as figuras 5.40 a 5.42 destacam os valores das distorções individuais associadas com as componentes de tensão de ordem 3, 5 e 7.

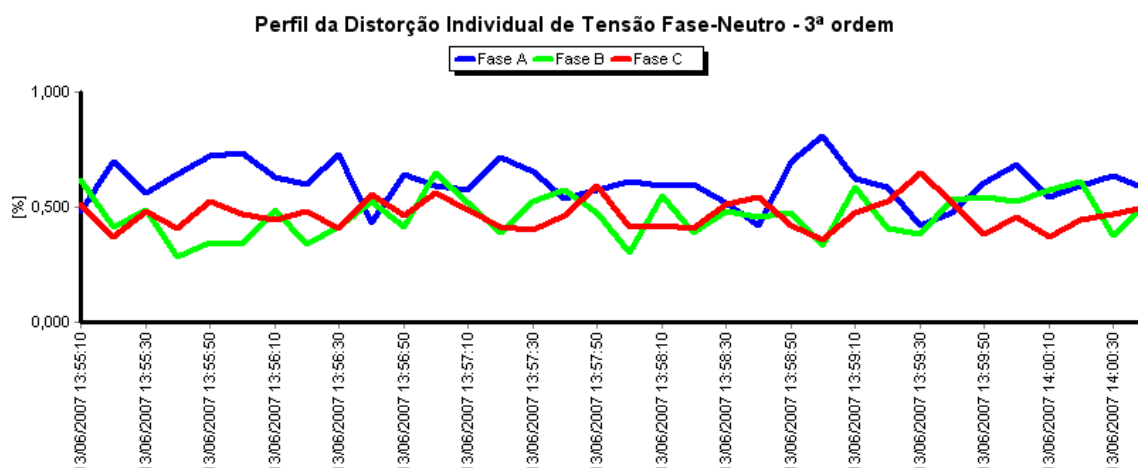


Figura 5.40 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem

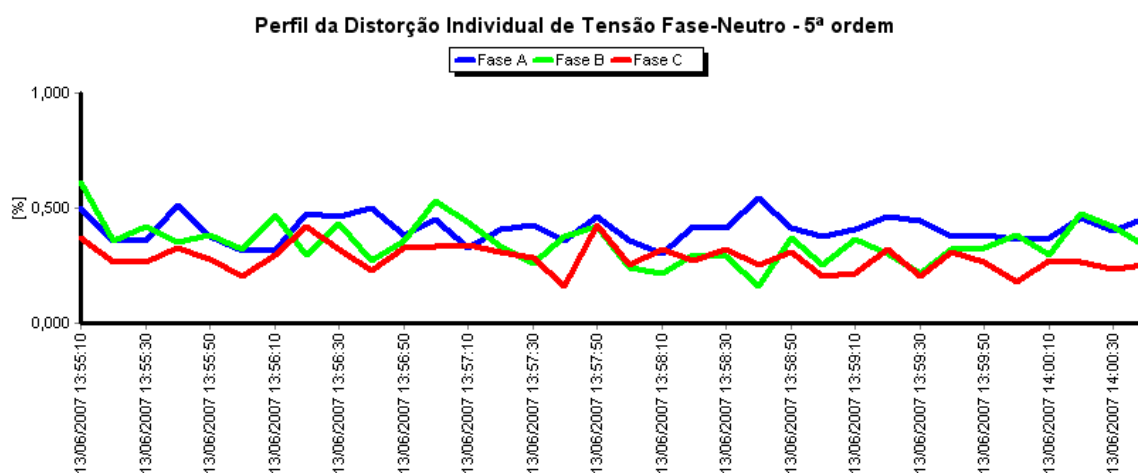


Figura 5.41 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem

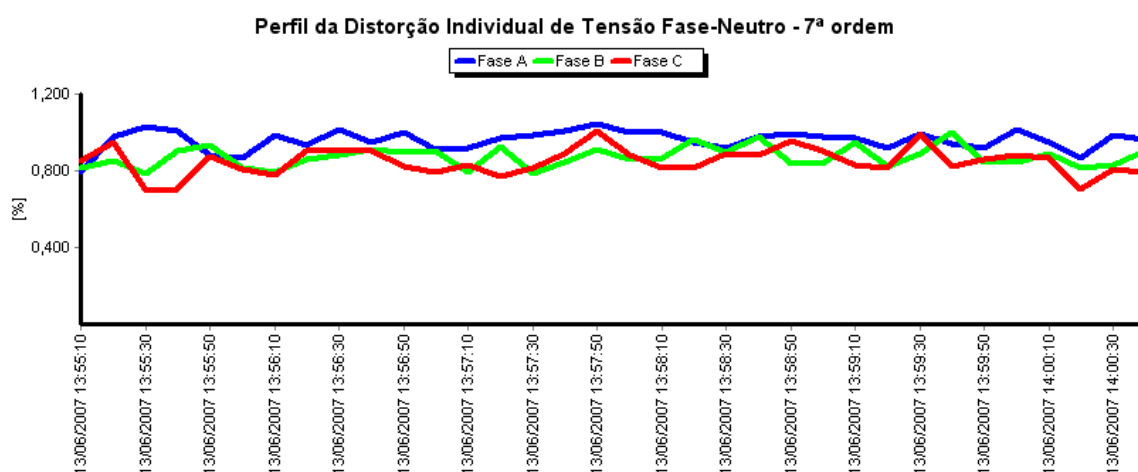


Figura 5.42 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem

As tabelas 5.11 a 5.13 apresentam os cálculos estatísticos referentes às distorções harmônicas individuais de tensão de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Novamente, os valores estão expressos em percentuais das correspondentes grandezas fundamentais.

Tabela 5.11 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,42	0,60	0,81	0,73
B	0,28	0,47	0,65	0,61
C	0,36	0,47	0,65	0,57

Tabela 5.12 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,30	0,41	0,54	0,51
B	0,16	0,35	0,61	0,49
C	0,16	0,28	0,42	0,39

Tabela 5.13 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,80	0,96	1,04	1,02
B	0,78	0,87	1,00	0,97
C	0,70	0,85	1,01	0,97

Distorções Harmônicas Individuais de Corrente

As correntes harmônicas, correspondentes às frequências acima caracterizadas, são apresentadas na sequência.

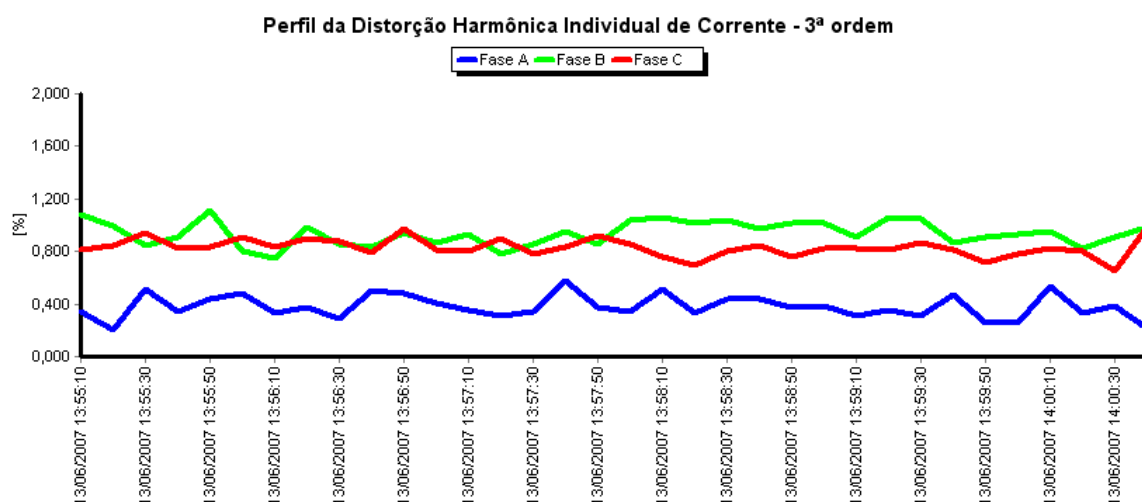


Figura 5.43 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 3ª ordem

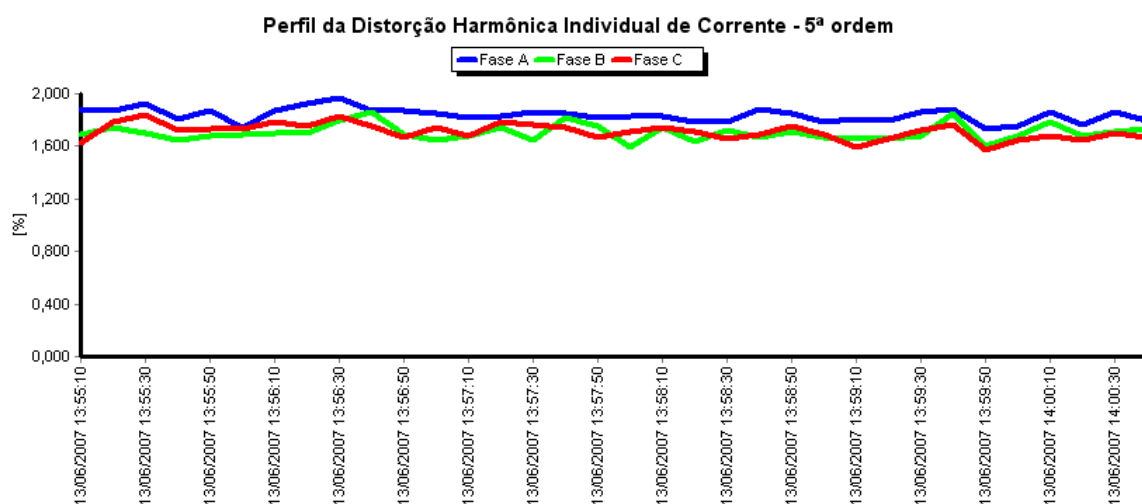


Figura 5.44 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 5ª ordem

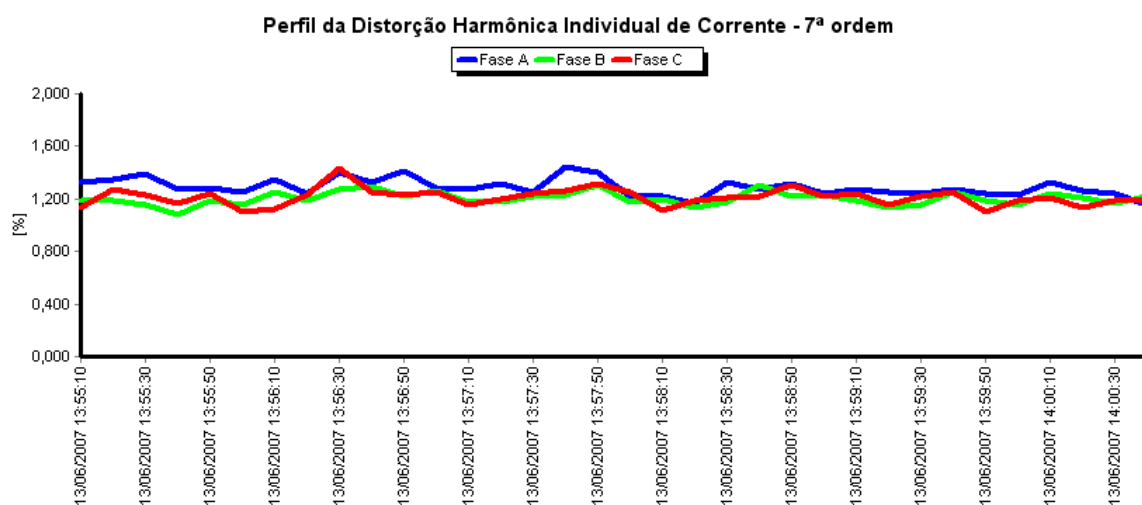


Figura 5.45 – Perfil das distorções harmônicas individuais das correntes – 7ª ordem

As tabelas 5.14 a 5.16 apresentam os cálculos estatísticos referentes às distorções harmônicas individuais de corrente de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Mais uma vez, as grandezas são fornecidas em valores percentuais das suas respectivas fundamentais.

Tabela 5.14 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 3ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,20	0,38	0,58	0,52
B	0,75	0,94	1,11	1,07
C	0,65	0,83	0,98	0,95

Tabela 5.15 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 5ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,30	0,41	0,54	0,51
B	0,16	0,35	0,61	0,49
C	0,16	0,28	0,42	0,39

Tabela 5.16 – Valores estatísticos das distorções individuais das correntes – 7ª ordem.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	1,73	1,84	1,97	1,93
B	1,59	1,71	1,86	1,83
C	1,57	1,71	1,84	1,80

d) Cálculo das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

Para a separação das distorções harmônicas de tensão provenientes do consumidor e do supridor, novamente lança-se mão do programa computacional ATRES, objeto do capítulo anterior. Os resultados estão detalhados na sequência, sendo que, para cada conjunto de informações, são apresentados gráficos de tendência, em conjunto com a respectiva tabela indicativa dos cálculos estatísticos referentes à grandeza sob análise.

Distorções Harmônicas Totais de Tensão

As figuras 5.46 e 5.47 e respectivas tabelas de tratamento estatístico apresentam, para o intervalo de tempo adotado para a aplicação do método da atribuição das responsabilidades, as parcelas das distorções totais associadas com o consumidor e com a concessionária, respectivamente.

• CONSUMIDOR

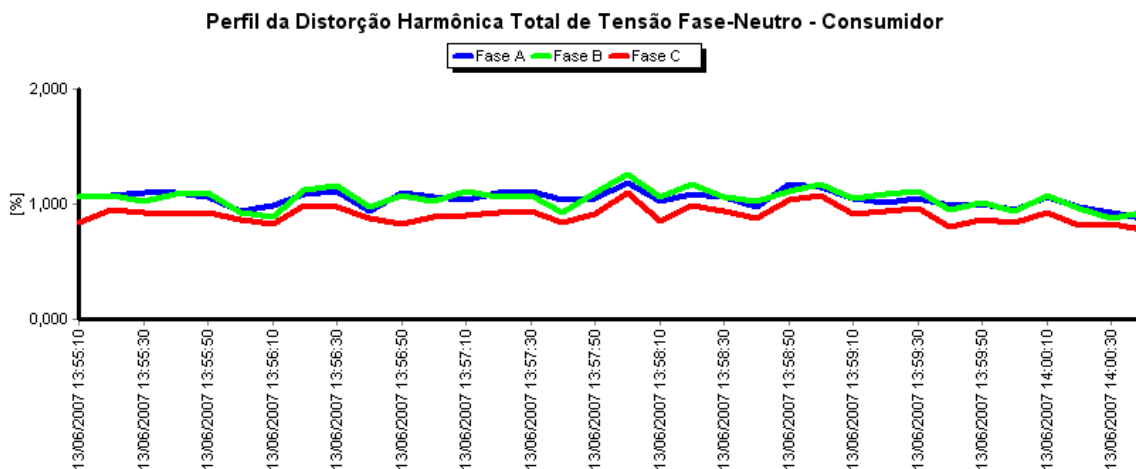


Figura 5.46 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Consumidor.

Tabela 5.17 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,88	1,04	1,19	1,16
B	0,88	1,05	1,26	1,17
C	0,78	0,91	1,10	1,05

• CONCESSIONÁRIA

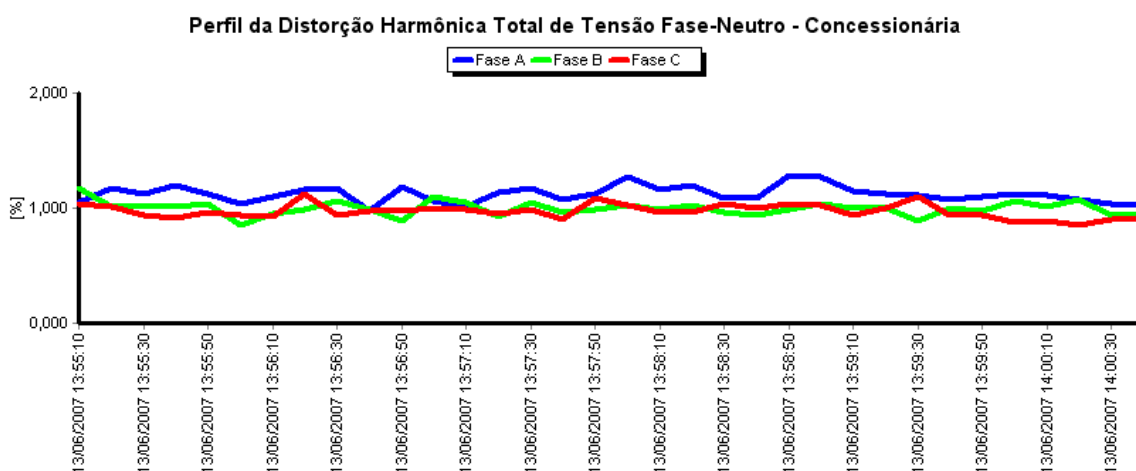


Figura 5.47 – Perfil das distorções harmônicas totais de tensão – Concessionária.

Tabela 5.18 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões – Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,98	1,12	1,28	1,28
B	0,85	1,00	1,17	1,08
C	0,85	0,97	1,12	1,09

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 3ª Ordem

• CONSUMIDOR

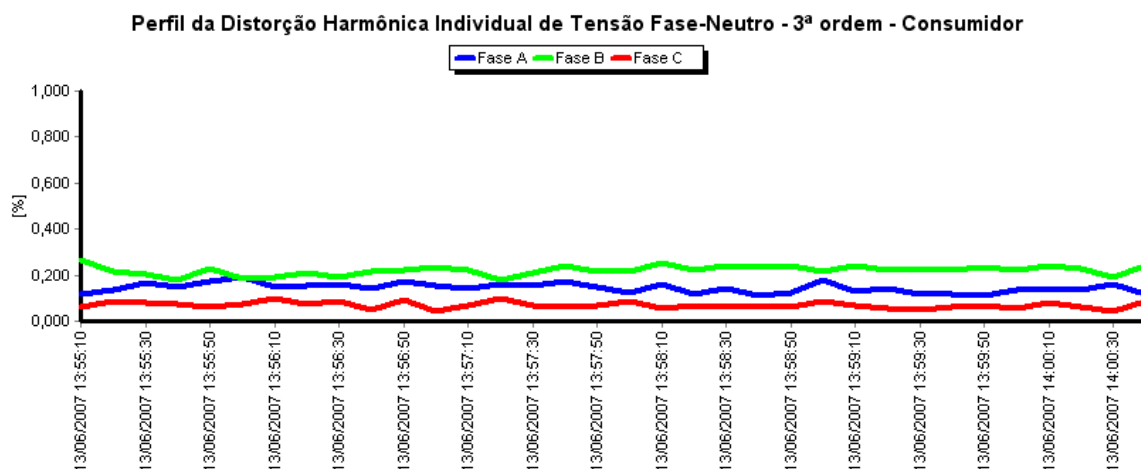


Figura 5.48 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.19 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,11	0,14	0,19	0,18
B	0,18	0,22	0,26	0,25
C	0,04	0,07	0,10	0,09

• CONCESSIONÁRIA

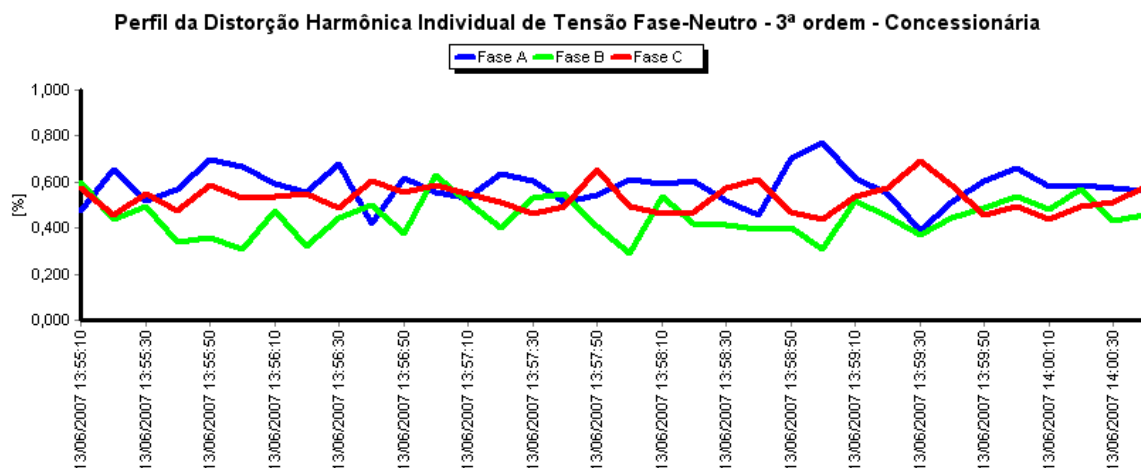


Figura 5.49 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 3ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.20 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 3ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,39	0,58	0,77	0,70
B	0,29	0,45	0,63	0,58
C	0,44	0,53	0,69	0,62

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 5ª Ordem

• CONSUMIDOR

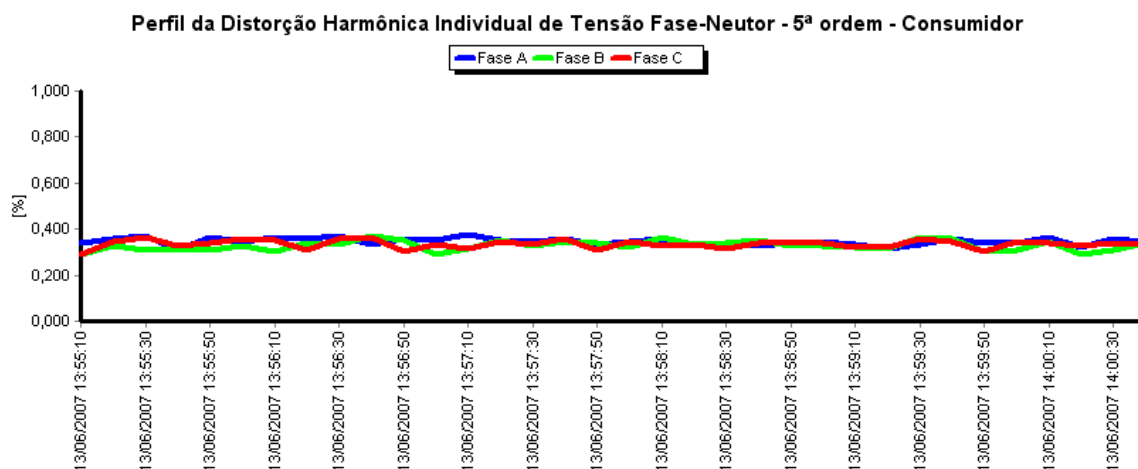


Figura 5.50 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.21 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,31	0,35	0,38	0,37
B	0,29	0,33	0,37	0,36
C	0,29	0,34	0,37	0,36

• CONCESSIONÁRIA

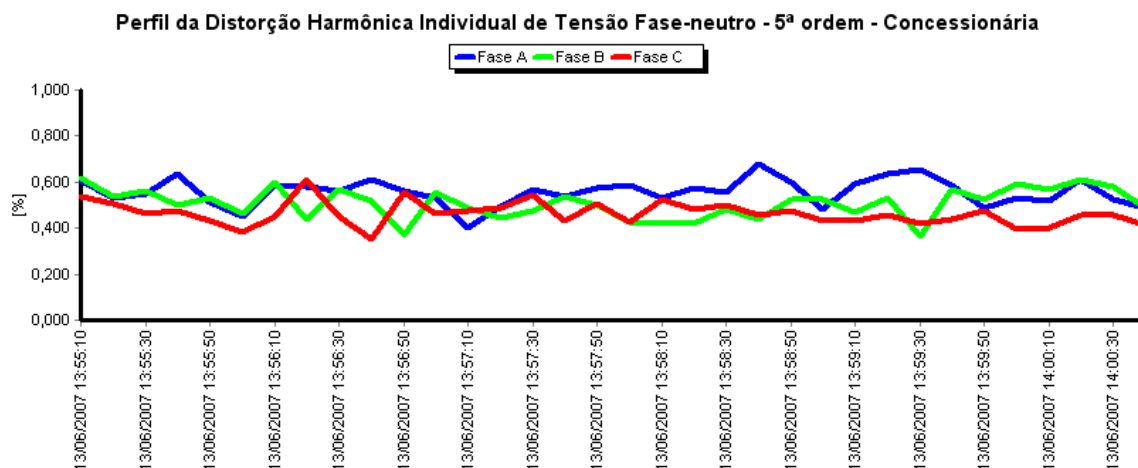


Figura 5.51 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 5ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.22 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 5ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,40	0,56	0,68	0,64
B	0,36	0,51	0,62	0,60
C	0,35	0,46	0,61	0,55

Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – 7ª Ordem

- **CONSUMIDOR**

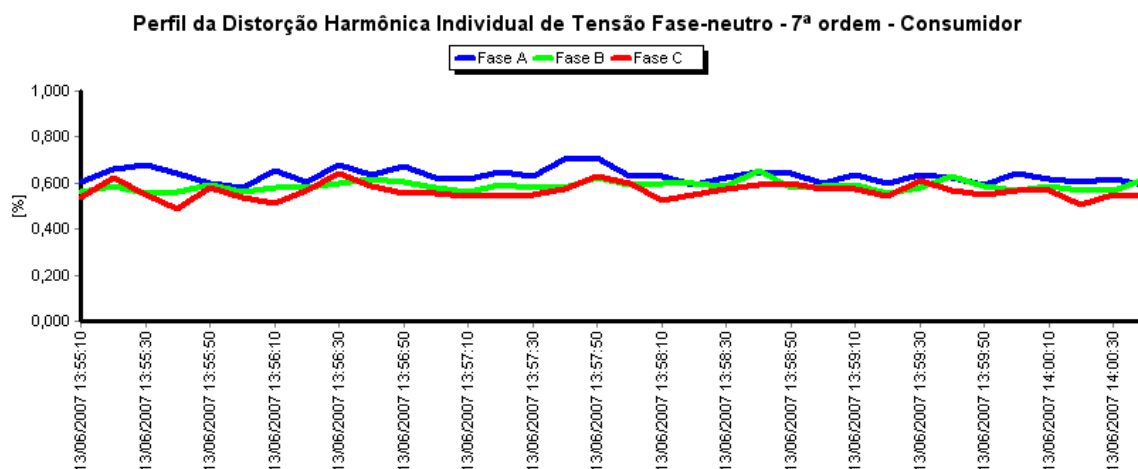


Figura 5.52 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Consumidor.

Tabela 5.23 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem - Consumidor.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,58	0,63	0,71	0,69
B	0,56	0,59	0,65	0,62
C	0,49	0,56	0,64	0,63

- **CONCESSIONÁRIA**

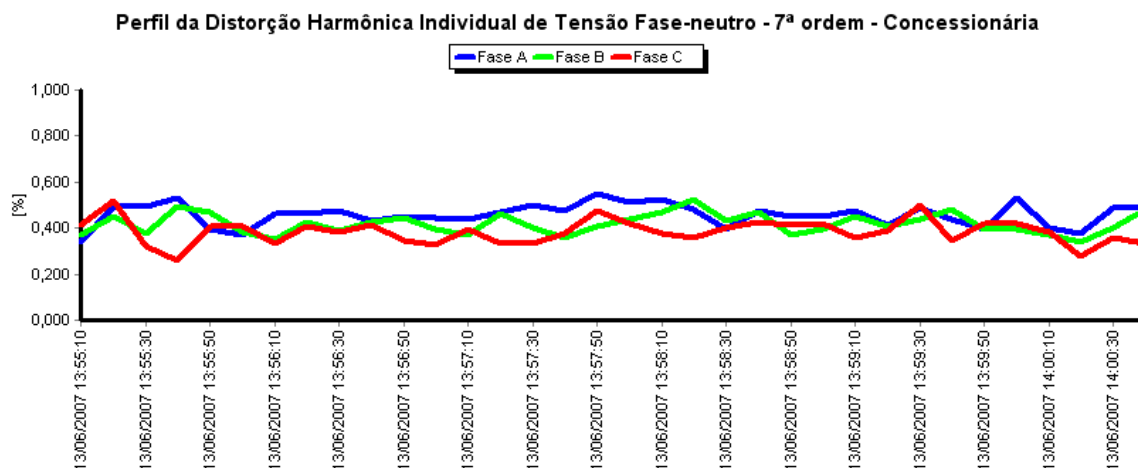


Figura 5.53 – Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão – 7ª ordem – Concessionária.

Tabela 5.24 – Valores estatísticos das distorções individuais das tensões – 7ª ordem - Concessionária.

Fase	Mín	Méd	Máx	P95
A	0,34	0,46	0,55	0,53
B	0,34	0,42	0,52	0,49
C	0,26	0,38	0,52	0,48

Comentários:

- As figuras 5.48 e 5.49 evidenciam que a concessionária se apresenta como sendo a principal fonte das distorções harmônicas de ordem 3 junto ao PAC. A diferença em relação à contribuição do consumidor é claramente observada na figura 5.54, onde as distorções para a fase A são inseridas em um mesmo gráfico de tendência.

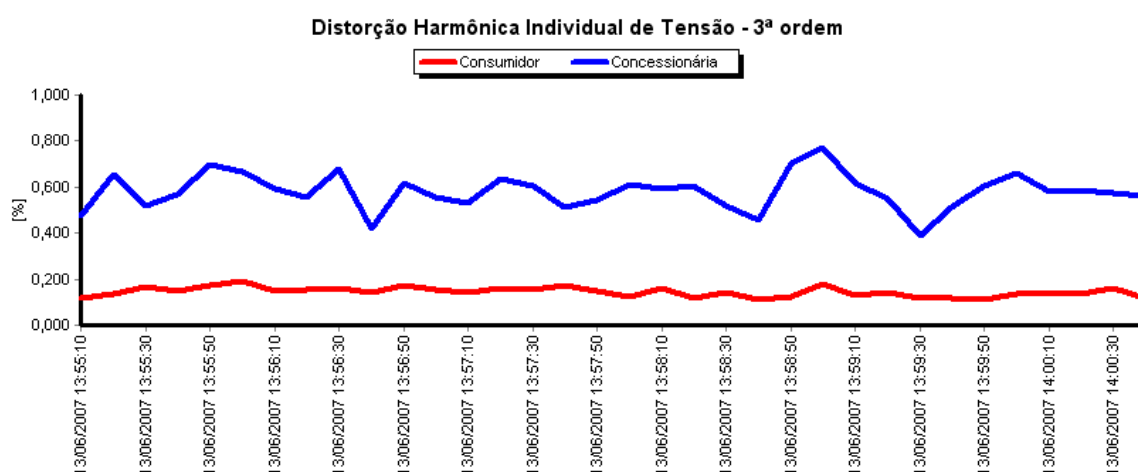


Figura 5.54 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 3 resultantes para o consumidor e para a concessionária.

Esta constatação seria esperada para este tipo de consumidor, pois a carga não-linear do mesmo é praticamente constituída por retificadores trifásicos de grande potência. Estes, em condições normais de operação não produzem correntes desta frequência, ou caso as mesmas existam, estas são de pequena magnitude.

- Os resultados enfatizam que a concessionária é também a principal responsável pelas distorções harmônicas de ordem 5, conforme evidenciado pelas figuras 5.50 e 5.51. Esta característica também seria esperada, visto que os grupos retificadores (cargas não lineares do consumidor) são conectados através de transformadores defasadores adequados à formação de arranjos de 36 ou 48 pulsos. Vale ainda ressaltar que os arranjos de retificadores, à exceção de um único conjunto, possuem filtros harmônicos

sintonizados em aproximadamente 300 Hz, minimizando, assim, quaisquer correntes harmônicas decorrentes de desequilíbrios entre as unidades de cada grupo de retificação. A figura 5.55, compondo os desempenhos das duas partes ao longo do tempo, ilustra esta tendência em uma das fases.

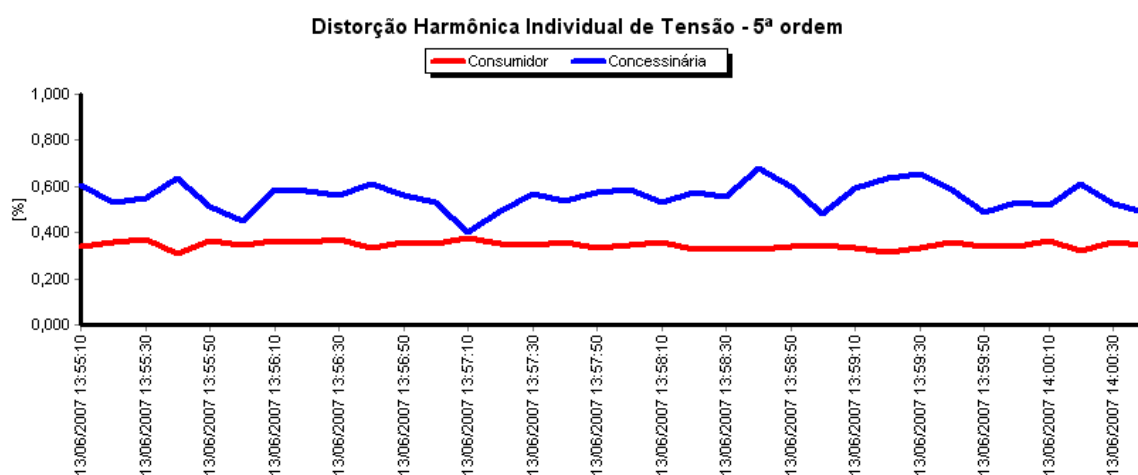


Figura 5.55 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 5 resultantes para o consumidor e para a concessionária.

- De acordo com as figuras 5.52 e 5.53, as distorções harmônicas de ordem 7 são predominantemente de responsabilidade do consumidor. Em função das características das cargas não lineares do consumidor, seria esperado que as distorções nesta frequência fossem também pequenas. Tal pressuposto seria decorrente dos arranjos dos retificadores e ainda, a presença de filtros harmônicos de 5ª ordem, que contribuem para reduzir as correntes de 7ª. No entanto, existe uma particularidade própria à instalação em questão, pois no barramento do consumidor de 88 kV encontra-se conectado um banco de capacitores, o qual amplifica as distorções desta ordem (ressonância paralela). Isto pode ser observado através das medições realizadas neste barramento e reproduzidas na figura 5.56.

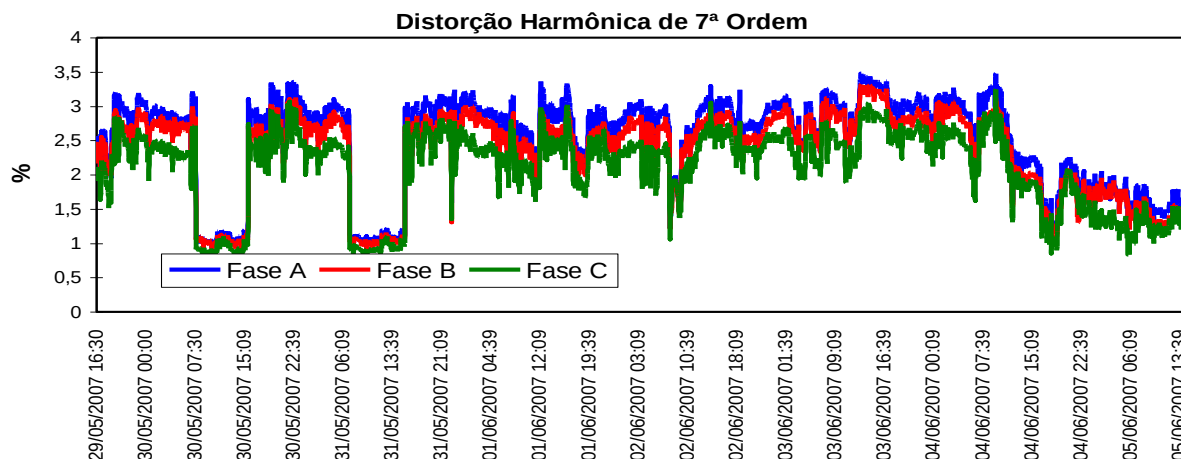


Figura 5.56 – Perfil das distorções harmônicas individuais de 7ª ordem no barramento de 88 [kV].

Na figura observa-se dois momentos em que as distorções harmônicas de 7ª ordem são reduzidas significativamente. Estes coincidem com os horários em que houve a retirada do banco de capacitores para manutenção.

Diante do exposto, a predominância do consumidor sobre a concessionária para esta frequência é justificada, pois o banco de capacitores estava conectado quando das medições em 230 kV.

A figura 5.57 sintetiza as responsabilidades das partes quanto à distorção harmônica de tensão de 7ª ordem.

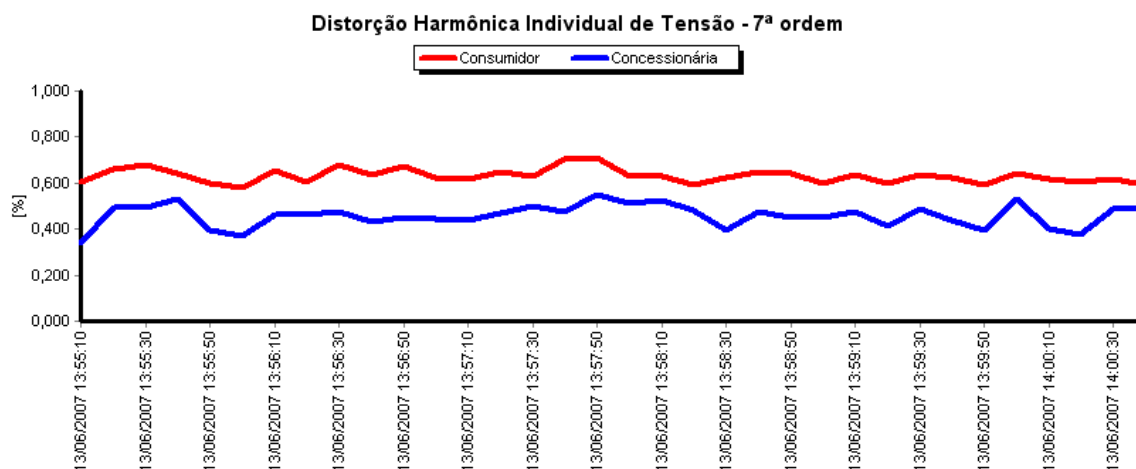


Figura 5.57 – Comparação entre as distorções harmônicas de ordem 7 resultantes para o consumidor e para a concessionária.

- Para as distorções harmônicas totais, como evidencia a figura 5.58, há uma ligeira predominância da concessionária, o que está condizente com o domínio das componentes de ordem 3 e 5.

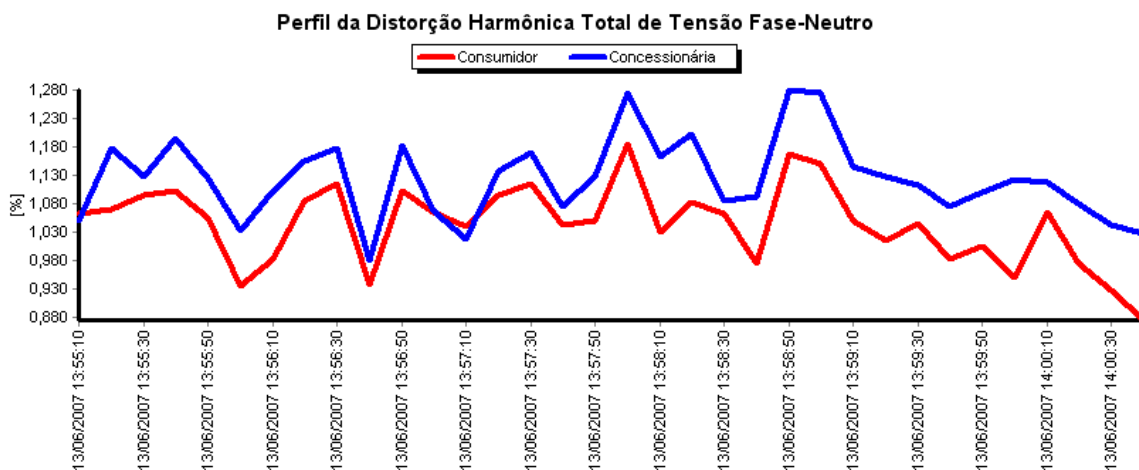


Figura 5.58 – Comparação entre as distorções harmônicas totais resultantes para o consumidor e para a concessionária.

5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi direcionado ao processo de avaliação de desempenho da metodologia proposta para o compartilhamento da responsabilidade sobre as distorções harmônicas, a qual foi materializada através do software denominado por ATRES. Neste contexto, utilizando inicialmente um arranjo laboratorial, foram executados trabalhos sob situações controladas no que tange a origem das distorções e, seqüencialmente, o processo foi aplicado a um sistema real e típico de complexos industriais contendo um expressivo número de cargas não lineares. Os resultados obtidos foram então empregados para fins da análise da consistência da proposta e do produto final desta tese.

Tendo em vista que as investigações conduzidas no ambiente de laboratório permitem o prévio conhecimento das grandezas e parâmetros atrelados ao sistema sob análise, esta estratégia permite uma evidente comparação entre os resultados oferecidos pelo processo desenvolvido e os valores de referência ou esperados. Nestes termos, a exatidão da metodologia é facilmente avaliada, conforme esclarecido no texto, através da realização de sete experimentos, cada qual com características próprias, e subsequente aplicação da proposta desta tese. De um modo geral, nesta primeira fase dos trabalhos, constatou-se uma boa correlação entre os valores esperados e os calculados e os seguintes pontos fundamentais foram observados:

- Os parâmetros da carga equivalente do consumidor não influenciaram, de forma significativa, os resultados obtidos quanto as parcelas de responsabilidades, quando o consumidor se constitui na principal fonte geradora das distorções.
- Mesmo para os casos em que os valores numéricos das parcelas de responsabilidade obtidas pelo método se apresentaram com certos desvios dos valores esperados, não

se constatou, para qualquer condição investigada, uma inversão da responsabilidade sobre as distorções.

- A inversão de 180° no ângulo de defasagem das distorções oriundas da concessionária não afetou o desempenho da metodologia e, mais uma vez, a proposta mostrou-se satisfatória.
- A maior discrepância entre as distorções esperadas e as calculadas foi observada para ordem 7. Este fato encontra justificativa na proximidade desta frequência com uma ressonância encontrada para o arranjo utilizado. Nestas condições, qualquer imprecisão, mesmo que pequena, nos parâmetros da carga equivalente da carga pode resultar em uma diferença significativa na impedância deste ponto. Não obstante este fato, não houve maiores prejuízos ao processo de separação das responsabilidades.
- As distorções individuais de responsabilidade exclusiva do consumidor e do supridor sempre conduziram a resultados condizentes e atestaram a aplicabilidade do princípio da superposição.

Por fim, a metodologia foi aplicada a um conjunto de registros de distorções harmônicas obtidas de um sistema elétrico real, junto a um barramento de 230 kV. Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia, diferentemente da situação laboratorial controlada, não possui valores de referência ou valores esperados. Desta forma, não restou outra alternativa senão fundamentar as análises, dos valores obtidos pela utilização do aplicativo ATRES, através das características associadas com a carga do consumidor e do conhecimento operacional da rede básica na região circunvizinha ao PAC. Dentro deste cenário, o desempenho da proposta se mostrou fisicamente consistente com as expectativas, mostrando, novamente, que o processo se apresenta compatível com as metas almejadas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, tecer comentários gerais sobre os trabalhos e resultados obtidos, proporcionando uma visão ampla e sucinta da pesquisa e da tese como um todo.

Utilizando a estratégia de sintetizar as principais contribuições associadas a cada unidade componente deste trabalho, ressaltam-se os seguintes pontos principais:

- O Capítulo I, de caráter introdutório, ofereceu uma abordagem geral sobre o tema Qualidade da Energia Elétrica, com ênfase à sub-área Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência e, focando de modo particular, alguns aspectos relativos ao cerne desta pesquisa. Considerando, pois, a questão da separação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, as principais publicações associadas ao tema abordado nesta tese foram sintetizadas e detectados os avanços e lacunas existentes no contexto do tema. Esta revisão bibliográfica permitiu verificar que, muito embora a relevância do assunto, poucos autores centraram suas atenções nesta controvertida questão do relacionamento entre consumidores e supridores. Por fim, foram estabelecidos os objetivos gerais e a estrutura desta pesquisa de doutorado;

- Na seqüência dos desenvolvimentos foi dada atenção à modelagem e análise, via princípios básicos de circuitos elétricos, do Ponto de Acoplamento Comum entre uma dada concessionária um dado consumidor. Para tanto foram utilizadas técnicas baseadas no domínio da freqüência, visto que, tradicionalmente, esta estratégia tem se mostrada útil e válida para os tipos de estudos aqui considerados. Além dos embasamentos físicos e matemáticos, foram realizados estudos computacionais para avaliação dos procedimentos de cálculo e ponderação sobre as imprecisões relativas às impedâncias harmônicas envolvidas no processo de atribuição das responsabilidades. Os estudos computacionais contidos nesta unidade permitiram concluir que a utilização de sinais de tensão e corrente medidos junto ao PAC, em conjunto com as impedâncias do sistema supridor e do consumidor, fornecem as informações necessárias ao cálculo das contribuições de cada uma das partes envolvidas na composição das distorções harmônicas totais e individuais de tensão no PAC;
- Complementarmente, o Capítulo III apresentou uma proposta para a obtenção de parâmetros representativos da impedância harmônica equivalente das cargas consumidoras contendo componentes lineares e não-lineares agregados. O modelo, baseado na associação paralela de elementos resistivos, indutivos e capacitivos, fundamentou seu processo de cálculo nos princípios da conservação da energia e injeções residuais de componentes harmônicas, objetivando o cumprimento de princípios básicos da eletricidade. A proposta feita foi seqüencialmente avaliada através de estudos computacionais que, a partir de sinais conhecidos de tensão e correntes medidos no PAC, culminaram pela determinação dos parâmetros e grandezas harmônicas equivalentes do consumidor. Estes dados, conjuntamente com

as informações relativas à impedância harmônica do supridor formaram, então, a base de dados para a utilização da proposta de compartilhamento de responsabilidade. Assim, estudos iniciais foram realizados com vistas a elucidar a aplicação do processo em arranjos hipotéticos e os resultados obtidos se mostraram apropriados aos fins desejados;

- Visando a integração da metodologia destinada à separação das responsabilidades com instrumentos de medição comerciais, o Capítulo IV propôs e desenvolveu um *software* destinado a quantificação das parcelas de distorções advindas de uma e outra parte. A estrutura computacional, além de permitir a importação de registros de harmônicos de tensão e corrente dos já mencionados equipamentos disponíveis no mercado, possibilita, ainda, o tratamento deste banco de dados, a aplicação dos procedimentos de cálculo e a disponibilização dos resultados obtidos nos termos da metodologia proposta. O aplicativo final, denominado ATRES, consiste, pois, num dos principais produtos desta tese e sua potencialidade e utilização foram ressaltadas nesta fase dos trabalhos;
- Por fim, o processo como um todo foi direcionado a duas aplicações práticas, uma de cunho laboratorial e outra voltada para um sistema real de grande porte. A primeira se justificou pelo fato das condições operacionais serem totalmente controladas e conhecidas, fornecendo, assim, uma base sólida de referência para os trabalhos de validação da proposta. A outra foi realizada com o objetivo de se atingir uma primeira etapa no processo de análise de consistência num ambiente que se apresenta com as reconhecidas aleatoriedades próprias aos complexos elétricos reais. Os resultados obtidos, de um modo geral, de mostraram compatíveis com as

expectativas, indicando, assim, que a proposta e produto desta tese evidenciam um bom caminho para a obtenção das respostas desejadas quando da aplicação de normas ou recomendações destinadas ao controle das distorções harmônicas.

Em complemento aos aspectos anteriormente abordados e atrelados à essência das unidades componentes da tese, é importante, ainda, ressaltar as seguintes conclusões gerais sobre o trabalho:

- Não obstante à reconhecida não linearidade do processo em pauta, a pesquisa demonstrou que a utilização de técnicas fundamentadas no domínio da frequência, aplicadas a sinais de tensão e correntes medidos, oferece as bases matemáticas necessárias à separação das distorções harmônicas provenientes do sistema supridor daquelas decorrentes das cargas não-lineares do consumidor;
- Embora se reconheça dificuldades na estimativa das impedâncias harmônicas do supridor e da carga, ressalta-se que a questão da carga é mais complexa em comparação com a impedância equivalente da concessionária;
- Caso haja dificuldades na determinação da impedância harmônica do supridor, esta situação poderá, em parte, ser contornada, caso as medições sejam feitas no lado secundário dos transformadores da subestação principal. Com tal procedimento, com certeza, a parcela da impedância dos transformadores será dominante, minimizando assim as imprecisões associadas com a rede de alimentação;
- Um ponto meritório de destaque refere-se ao processo de estimativa da impedância equivalente do consumidor. O processo, aqui empregado, foi baseado nas tensões e correntes medidas e, subsequente separação das parcelas ativa, reativa indutiva e capacitiva da carga do consumidor. Esta estratégia não foi encontrada em qualquer das referências consultadas e constitui-se num outro marco desta pesquisa. De um

modo geral a adequação do procedimento quanto a obtenção dos parâmetros equivalentes se mostrou efetiva e apropriada as fins desta pesquisa.

Como comentário final fica esclarecido que este trabalho, embora não tenha a pretensão de afirmar que o tema tenha sido esgotado, longe disto, procurou cumprir as expectativas de estabelecer o vínculo entre o sistema supridor e o consumidor quanto às distorções harmônicas de tensão medidas no PAC. Muito embora os indicativos positivos e reconhecidos avanços atingidos no tema central da pesquisa, o assunto deverá ainda merecer a atenção de análises futuras no sentido de minimizar os erros nos cálculos da impedância equivalente do consumidor e da impedância equivalente da concessionária, conciliando ainda um exaustivo trabalho de campo com vistas à consolidação do processo. Neste contexto, as seguintes pesquisas estão relacionadas a avanços posteriores a este trabalho:

- Estudo da impedância equivalente do consumidor através de técnicas fundamentadas em ferramentas estatísticas ou algoritmos de otimização, como por exemplo, algoritmos genéticos;
- Análise da impedância equivalente da concessionária de forma a permitir o cálculo da mesma através dos sinais medidos de tensão e corrente junto ao PAC;
- Verificação da viabilidade de implantação de metodologias de compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas em equipamentos de medição específicos para este fim;
- Diagnóstico sobre o compartilhamento das distorções harmônicas em um barramento contendo diversos consumidores, com a respectiva separação das parcelas de responsabilidade.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., “*Electrical power systems quality*”, 2^a ed., McGraw-Hill, New York, 2003.
- [2] KERCHNER, R. M., CORCORAN, G. F., “*Circuitos de corrente alternada*”, Tradução: Reynaldo Resende e Ruy Pinto da Silva Sieczkowski, 3^a ed., Porto Alegre-RS, 1977.
- [3] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “*Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica*”, Dezembro 2002.
- [4] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “*Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*”, Revisão: 30 de Agosto de 2006.
- [5] IEC 61000-3-6, “*Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*”, First Edition, Publicado por IEC, 1996-10.
- [6] IEEE STD. 519-1992, “*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, Publicado por IEEE, 1992.
- [7] TANAKA, T., AKAGI, H., “*A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 10, Issue 4, pp. 1737-1742, October 1995.
- [8] XU, WILSON, “*Power Direction Method Cannot Be Used for Harmonic Source Detection*”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 2, pp. 873-876, Seattle, WA, USA, 2000.

- [9] XU, W., LIU, X., LIU, Y., “An Investigation on the Validity of Power-direction Method for Harmonic Source Determination”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 18, Issue 1, pp. 214-219, January 2003.
- [10] RQE-III, “Registrador de Parâmetros de Qualidade de Energia – Guia do Usuário”, Reason Tecnologia S.A..
- [11] LEIRIA , A., DE BARROS, M. T. C., “Identification of harmonic content and their origin in power networks”, IEEE Bologna Power Tech Conference, Proceedings Volume 2, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [12] CHUN LI, WILSON XU, TAYJASANAT, T. “A “Critical Impedance” – Based Method for Identifying Harmonic Sources”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 19, Issue 2, pp. 671-678, April 2004.
- [13] SRINIVASAN, K., “On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 11, Issue 2, pp. 1003-1012, April 1996.
- [14] SRINIVASAN, K., JUTRAS, R., “Conforming and Non-conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 13, Issue 1, pp. 212-217, January 1998.
- [15] SRINIVASAN, K., “Attributing Harmonics in Private Power Production”, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 34, Issue 5, pp. 887-892, September/October 1998.
- [16] CHANDRA, A., MBANG, B., SRINIVASAN , K., SINGH , B. N., RASTGOUFARD, P., “A Method of Implementation of Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions Using an Active Filter”, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Volume 1, pp. 553-557, May 2003.
- [17] XU, WILSON, LIU, YILU, “A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-based Harmonic Control Applications”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 1, pp. 361-366, July 1999.
- [18] ZHANG , X., AHMED, E. E., XU, W., “Determination of Network Harmonic Impedances Using Steady-state Measurement”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 1, pp. 390-394, July 1999.

- [19] XU, W., AHMED, E. E., ZHANG, X., LIU, X. “*Measurement of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issues and their Solutions*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 17, Issue 1, pp. 210-216, January 2002.
- [20] XU, W., LIU, Y., “*A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Issue 2, pp. 804-811, April 2000.
- [21] MOUSTAFA, A. A., MOUSSA, A. M., EL-GAMMAL, M. A., “*Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems*”, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings Volume 3, pp. 1035-1040, October 2000.
- [22] SOLIMAN, S. A., AL-KANDARI, A. M., “*A Simple and Noval Technique for Linear and Nonlinear Load Modeling in the Time Domain*”, 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, Volume 3, pp. 1616-1619, May 1996.
- [23] HARTANA, R. K., RICHARDS, G. G., “*Harmonic Source Monitoring and Identification Using Neural Networks*”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 5, Issue 4, pp. 1098-1104, November 1990.
- [24] SRINIVASAN, D., NG, W. S., LIEW, A. C., “*Neural-network-based Signature Recognition for Harmonic Source Identification*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 21, Issue 1, pp. 398-405, January 2006.
- [25] MA, H., GIRGIS, A. A., “*Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter*, IEEE Transactions on Power Delivery”, Volume 11, Issue 3, pp. 1659-1665, July 1996.
- [26] YU, K. K. C., WATSON, N. R., ARRILLAGA, J., “*An Adaptive Kalman Filter Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 20, Issue 2, pp. 1577-1584, April 2005.
- [27] SILVA, S. F. P., OLIVEIRA, J. C., “*Uma Contribuição à Questão do Compartilhamento da Responsabilidade Dobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos*”, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, Julho 2006.
- [28] SILVA, S. F. P. OLIVEIRA, J. C., “*Distorções Harmônicas Associadas com o Supridor e o Consumidor: Um Procedimento Para a Identificação das Parcelas de Responsabilidade*”, Anais XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-BA, Outubro 2006.

- [29] SILVA, S. F. P., OLIVEIRA, J. C., “*Uma Proposta de Sistematização da Atribuição de Responsabilidade Sobre Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*”, Anais VI SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Volume I, pp. 365-370, Belém-PA, Agosto 2005.
- [30] ANDRADE JR., G. V., NAIDU, S. R., NÉRI, M. G. G., SOARES, R. M., COSTA, E. G., “*Contribuições da Distorção Harmônica de Tensão Entre Concessionária e Consumidor*”, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB, Julho 2006.
- [31] SANTOS, I. N., “*Uma contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas*”, Uberlândia: UFU, 2007 (Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica).
- [32] CEMIG ND-5.3, “*Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão, Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea*”, Normas técnicas, Belo Horizonte, Outubro de 2005.
- [33] ARRILAGA, J., WATSON, N. R., “*Power System Harmonics*”, John Wiley & Sons, Second Edition, 2003.
- [34] SSEP, “*Simulador de Sistemas Elétricos de Potência - Manual do Usuário*”, Versão V2, QUALITY Engenharia e Sistemas Ltda, www.qes.com.br.
- [35] UFU/ANEEL, “*Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica*”, Relatório Parcial 4, Julho de 2000.
- [36] MAKRAM, E. B., VARADAN, S., “*A Generalized Load Modeling in Presence of Harmonics and Distortion*”, Proceedings Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 124-128, March 1993.
- [37] EL ARINI, M. M. M., “*A Time Domain Load Modeling Technique and Harmonics Analysis*”, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Proceedings Volume II, pp. 930-938, Athens.
- [38] MARH 21, “*Analizador de Redes – Manual do Usuário*”, RMS Sistemas Eletrônicos Ltda.
- [39] BUDEANU, C. I., “*Reactive and Fictitious Powers*”, Publ. no. 2 of the Rumanian National Institute of Energy, Bucharest, Romania, 1927.

[40] HARMZS, “Estudo do Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas”, CEPEL.

[41] ANAREDE, “Sistema Integrado de Análise de Rede”, CEPEL.