
MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO COMO UMA NOVA PROPOSTA PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Ivan Nunes Santos*
ivan@eletrica.ufu.br

José Carlos de Oliveira*
jcoliveira@ufu.br

José Rubens Macedo Jr.*
jrubens.macedo@gmail.com

*Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Av. João Naves de Ávila 2160 Bloco 3N CEP 38400-902
Uberlândia - MG, Brasil

ABSTRACT

Modified Superposition Method as a New Approach to Assigning Responsibilities on Harmonic Distortions

Faced with the guidelines contained in documents approved by the National Electric Power Agency PRODIST - Module 8, among other indicators of electric power supply quality, the harmonic distortion emerges as an important issue. The mentioned regulation takes into account specific matters such as definitions, measurement procedures, benchmarks, etc. Having this in mind and recognizing that the mitigation techniques will often involve financial costs to fit the measured values to the recommended ones, the search for ways to determine the level of contribution between the supplier and the consumer appears as an important subject at sharing the technical and economical responsibilities. In general, the published approaches at attempting to provide the utility and consumer involvement are based on frequency domain techniques and superposition principles. Although the idea is quite simple, the required data are derived from harmonic measurement and the equivalent source and load harmonic impedance, being these parameters very hard to be obtained. Within this context, the present paper aims at providing means to apply the classical referred method to evalu-

ate the required harmonic contribution throughout a strategy to overcome the difficulties here mentioned.

KEYWORDS: Harmonic distortion, harmonic source detection, power quality, superposition and sharing harmonic responsibilities.

RESUMO

Diante das orientações contidas em documentos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) contempla, dentre outros indicadores de qualidade da energia elétrica, a temática das distorções harmônicas. O referido texto aborda questões associadas com definições, procedimentos de medição, valores de referência, etc. À luz destas determinações e reconhecendo que as soluções mitigadoras para adequação dos indicadores de desempenho envolvem expressivos custos financeiros, surge a questão da busca de meios para a determinação das responsabilidades sobre eventuais violações dos limites pré-estabelecidos para as distorções harmônicas. Dentre as propostas encontradas para se detectar as parcelas de contribuição advindas do supridor e do consumidor ressalta-se que, de um modo geral, as metodologias são fundamentadas em princípios que utilizam o domínio da frequência conciliado com a superposição de efeitos. Não obstante a simplicidade deste procedi-

Artigo submetido em 12/07/2011 (Id.: 1359)

Revisado em 21/10/2011, 09/03/2012, 15/04/2012

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Ivan Nunes Da Silva

mento destaca-se que o mesmo se apoia em informações de medições e no pré-conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e do consumidor, sendo estas últimas de difícil, ou mesmo impossível, acesso. Diante disto, o presente trabalho visa viabilizar meios para se contornar tais dificuldades e estabelecer uma sistemática adequada para obtenção do justo compartilhamento de responsabilidades entre as partes envolvidas.

PALAVRAS-CHAVE: Compartilhamento de responsabilidades, distorções harmônicas, detecção de fontes harmônicas, princípio da superposição e qualidade da energia elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Orientações contidas em documentos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2010) contemplam, dentre outros indicadores de qualidade da energia elétrica, a temática das distorções harmônicas. No cenário internacional o assunto se apresenta também bastante difundido e documentado através de publicações como: IEEE 519 (1992), EN 50160 (1996) e IEC 61000-3-6 (1996). Tais documentos abordam, no contexto das distorções harmônicas, distintos assuntos pertinentes à matéria, a exemplo de: definições, procedimentos de medição, valores de referência, etc. À luz destas orientações, e ainda, reconhecendo que as soluções mitigadoras para a adequação dos indicadores de desempenho envolvem expressivos custos financeiros (Emanuel, 1999), surge a questão da busca de meios para a determinação das responsabilidades sobre eventuais violações dos limites pré-estabelecidos para as distorções harmônicas.

Dentre as propostas encontradas na literatura para a caracterização das parcelas de responsabilidades entre os agentes envolvidos, a saber, o supridor e o consumidor, há de se reconhecer que, de um modo geral, as metodologias são fundamentadas em princípios que utilizam o domínio da frequência, conciliado com a superposição de efeitos (Caramia et al., 2009; Xu and Liu, 1999; Xu and Liu, 2000) e tais procedimentos se mostram mais promissores à solução dos desafios impostos pelo tema em pauta, em detrimento a outros fundamentados, por exemplo, na análise do fluxo de potência harmônica (Santos et al., 2011). De fato, não obstante a simplicidade destes procedimentos relacionados à superposição, no que tange aos seus conceitos e aplicação, é importante ponderar que um dos aspectos mais complexos para a aplicação prática do processo (Xu and Liu, 2000) está na necessidade do prévio conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e, de modo especial, do consumidor, grandezas estas fundamentais à exatidão do processo de análise.

À luz do exposto, pode-se afirmar que a qualidade dos resultados dos estudos de compartilhamento se apresenta altamente dependente das medições feitas junto ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e do conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes. E, diante das dificuldades para obtenção destas últimas grandezas, surge a estratégia contemplada neste artigo, a qual encontra-se também embasada no princípio da superposição e envolve a inserção de uma impedância harmônica dominante no PAC, produzindo, deste modo, um procedimento diferenciado em relação ao estabelecido na literatura até o presente momento. Este procedimento, a ser esclarecido no artigo, prima por sua simplicidade, praticidade e objetividade para contemplar os objetivos aqui delineados. O método assim definido, devido a suas características e fundamentação distintas das propostas clássicas, foi designado de Método da Superposição Modificado.

Vale ainda ressaltar que as publicações internacionais contemplam outros procedimentos para o compartilhamento de responsabilidades, os quais estão fundamentados em distintas técnicas e que receberam, portanto, designações próprias, a exemplo de: “método do fluxo de potência harmônica” (Tanaka and Akagi, 1995; Cristaldi and Ferrero, 1995; Swart et al., 1996; Lin et al., 2005); “corrente conforme e não-conforme” (Srinivasan, 1996; Srinivasan and Jutras, 1998; Peretto et al., 2003); “redes neurais” (Hartana and Richards, 1990; Srinivasan et al., 2006; Mazumdar et al., 2008); “estimação de estado com filtro de Kalman” (Ma and Giris, 1996; Yu et al., 2005). De um modo geral, estas publicações procuram identificar tão somente a origem da principal fonte de distorções, não se preocupando, de forma direta, em estabelecer procedimentos para a separação das parcelas de contribuição referentes ao consumidor e a concessionária.

Procurando, então, avançar na direção do oferecimento de um processo consistente e exequível para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, em consonância com os propósitos estabelecidos, este artigo contempla, de forma pontual, os seguintes aspectos:

- Considerações sobre os métodos originais que utilizam o princípio da superposição de correntes e tensões harmônicas no PAC, em consonância com Xu and Liu (2000) e Caramia et al. (2009);
- Proposição de um procedimento que possibilite a aplicação da metodologia da superposição sem maiores influências das impedâncias equivalentes do sistema suprido e/ou do consumidor;
- Avaliação de desempenho computacional e experimental da metodologia proposta, qual seja, o Método da Superposição Modificado.

2 METODOLOGIA CLÁSSICA DA SUPER-POSIÇÃO

Na sequência, é realizada uma análise que sintetiza os princípios físicos, matemáticos e de desempenho do procedimento clássico de superposição empregado para fins de atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes em um determinado ponto de acoplamento do sistema elétrico.

2.1 Fundamentação Teórica

A Fig. 1 caracteriza uma configuração genérica e representativa de um sistema elétrico visto a partir do PAC. O consumidor é representado por cargas lineares e não lineares, enquanto a rede de alimentação é simplificada na forma de um arranjo equivalente e representativo da geração, transmissão, distribuição, outros consumidores, etc.

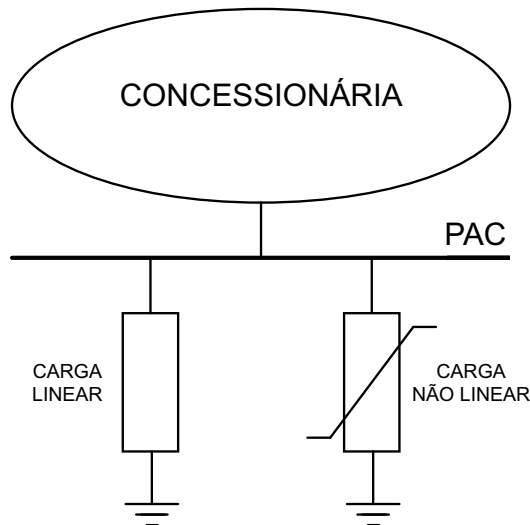


Figura 1: Complexo elétrico constituído por um supridor e um consumidor contendo cargas lineares e não lineares.

O arranjo físico apresentado pode ser modelado através de seu circuito equivalente de Norton, mostrado na Fig. 2. Este deve ser compreendido como uma representação que utiliza de técnicas de modelagem no domínio da frequência, a qual representa tantos circuitos equivalentes quanto forem as ordens harmônicas existentes para análise (Arrillaga and Watson, 2003). Nestas circunstâncias, haverá distintos circuitos representativos, cada qual atrelado com a harmônica focada e representada por h . Tanto a fonte representativa da concessionária quanto a combinação da carga linear e não linear são indicadas neste equivalente.

Nesta figura:

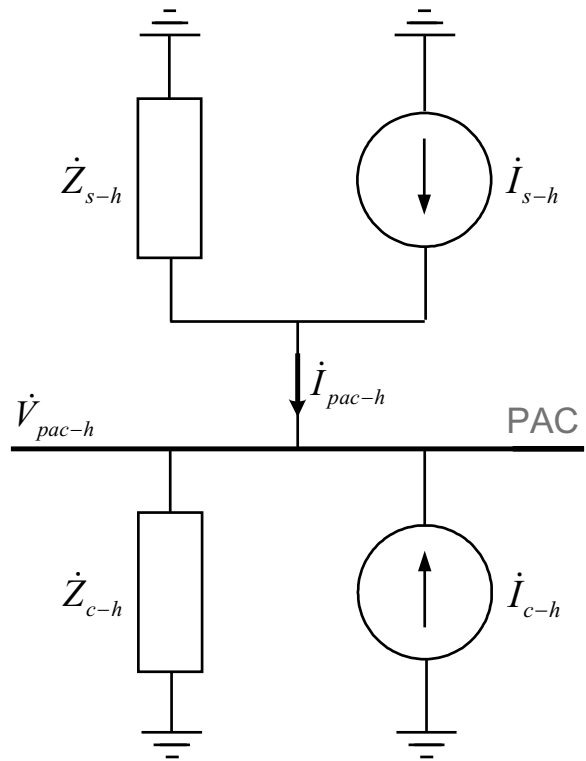


Figura 2: Circuito equivalente de Norton do sistema elétrico para uma dada ordem harmônica h .

- \dot{Z}_{s-h} : impedância harmônica equivalente da concessionária para a ordem h ;
- \dot{Z}_{c-h} : impedância harmônica equivalente do consumidor para a ordem h ;
- \dot{I}_{s-h} : corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pela concessionária;
- \dot{I}_{c-h} : corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor;
- \dot{V}_{pac-h} : tensão harmônica de ordem h no PAC;
- \dot{I}_{pac-h} : corrente harmônica de ordem h no PAC.

As equações (1) e (2) estabelecem as correntes harmônicas geradas por cada uma das fontes de corrente representativas das cargas não lineares presentes nos circuitos do supridor e do consumidor, respectivamente.

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - \dot{I}_{pac-h} \quad (2)$$

As contribuições de cada uma das partes envolvidas para a corrente total (\dot{I}_{pac-h}) e para a tensão total (\dot{V}_{pac-h}) no PAC

podem ser encontradas por meio do princípio da superposição. Os circuitos relacionados com esta estratégia de análise podem ser visualizados nas Fig. 3(a) e (b). A primeira figura está voltada para a determinação das contribuições advindas do circuito da concessionária (para a corrente total e tensão total) e a segunda está associada com as contribuições provenientes do consumidor. Neste momento considera-se oportuno lembrar que o uso do princípio da superposição para situações envolvendo componentes não lineares se mostra, numa primeira análise, inconsistente com os fundamentos físicos estabelecidos pela teoria de circuitos elétricos. Não obstante o reconhecimento e concordância com tais prerrogativas, é importante ressaltar que o processo em pauta encontra-se aplicado, individualmente, para cada uma das frequências envolvidas no processo. Isto posto fica evidenciado que o cerne da questão da superposição está vinculado com uma mesma frequência produzida pelos dois agentes envolvidos no processo excluindo pois o envolvimento das demais ordens para um cálculo específico. Portanto, não há superposição de efeitos distintos de uma frequência sobre outra.

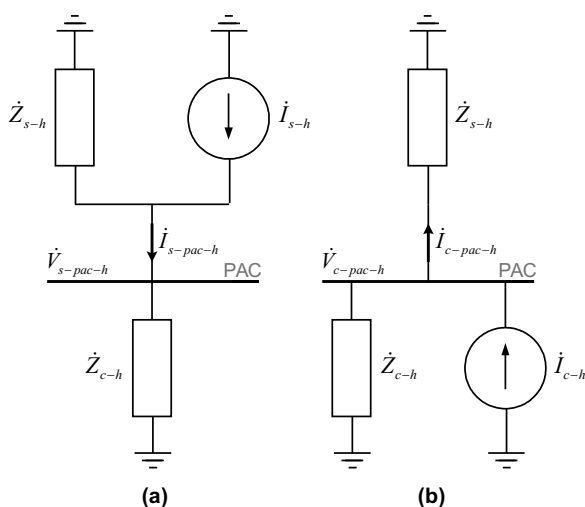


Figura 3: Circuitos equivalentes de Norton para uma ordem harmônica h considerando: (a) contribuição da fonte e (b) contribuição do consumidor.

Na Fig. 3

- $\dot{I}_{s-pac-h}$: contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente total \dot{I}_{pac-h} ;
- $\dot{I}_{c-pac-h}$: contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente total \dot{I}_{pac-h} ;
- $\dot{V}_{s-pac-h}$: contribuição de tensão harmônica de ordem h da concessionária para a tensão total \dot{V}_{pac-h} ;
- $\dot{V}_{c-pac-h}$: contribuição de tensão harmônica de ordem h do consumidor para a tensão total \dot{V}_{pac-h} .

As contribuições de correntes harmônicas podem ser encontradas por meio da aplicação de princípios tradicionais de análise de circuitos e, no que tange às tensões, procedimentos similares podem ser utilizados, como esclarecido a seguir.

2.1.1 Metodologia da Superposição de Correntes.

As contribuições para a corrente harmônica total no PAC podem ser determinadas através das equações (3) e (4).

$$\dot{I}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{s-h} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{c-h} \quad (4)$$

Por conseguinte, a corrente total no PAC poderá ser obtida através da superposição destas componentes, ou seja:

$$\dot{I}_{pac-h} = \dot{I}_{s-pac-h} + (-\dot{I}_{c-pac-h}) \quad (5)$$

O método da superposição de correntes proposto em Xu and Liu (2000) estabelece que o compartilhamento das responsabilidades entre as partes deve ser feito por meio dos valores das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais de corrente ($@WL - SHAPEOK$ e $-\dot{I}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da corrente total (\dot{I}_{pac-h}). Estas projeções estão evidenciadas na Fig. 4.

Onde:

- $I_{s-proj-h}$: projeção de $\dot{I}_{s-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} ;
- $I_{c-proj-h}$: projeção de $-\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} .

Vale ressaltar, que o procedimento aqui apresentado realiza, tão somente, a separação de responsabilidades das distorções harmônicas de corrente presente no PAC. Na sequência será apresentado um procedimento semelhante, contudo voltado para o compartilhamento das distorções harmônicas de tensão.

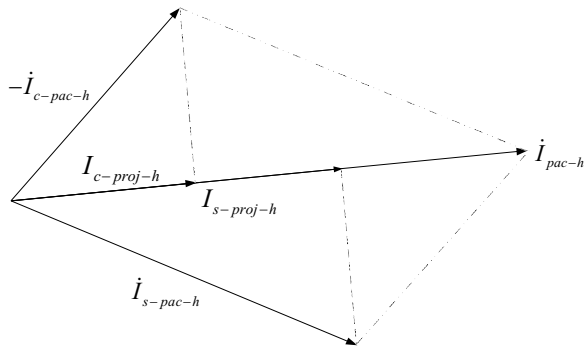


Figura 4: Decomposição da corrente PAC em dois escalares advindos das projeções.

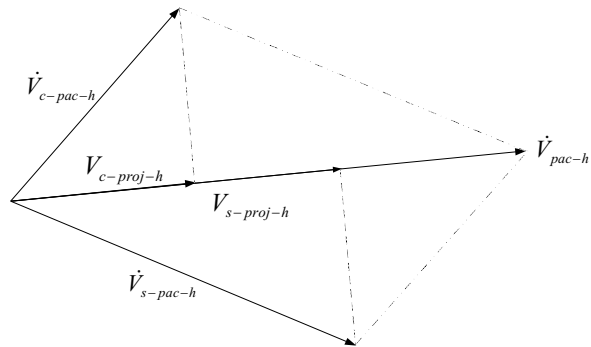


Figura 5: Decomposição da tensão no PAC em dois escalares advindos das projeções.

2.1.2 Metodologia da Superposição de Tensões.

As contribuições para a tensão harmônica total no PAC podem ser determinadas através das equações (6) e (7), segundo Caramia et al. (2009).

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{s-h} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \dot{I}_{c-h} \quad (7)$$

A tensão total no PAC poderá, então, ser obtida conforme se segue:

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{s-pac-h} + \dot{V}_{c-pac-h} \quad (8)$$

O método da superposição de tensões segue a mesma estratégia apresentada para superposição de correntes. Portanto, o princípio para o compartilhamento das responsabilidades entre os agentes deve ser realizado por meio dos valores das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais de tensão ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da tensão total (\dot{V}_{pac-h}), como indicado na Fig. 5.

Em que:

- $V_{s-proj-h}$: projeção de $\dot{V}_{s-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} ;
- $V_{c-proj-h}$: projeção de $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .

Ademais, a aplicação prática do método da superposição, seja via superposição de correntes ou tensões, nos termos discutidos, compreenderá a seguinte rotina:

- Determinação das impedâncias equivalentes \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} ;

- Medições em campo para se determinar \dot{I}_{pac-h} ;
- Cálculo das fontes equivalentes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} empregando-se, respectivamente, as equações (1) e (2);
- Para a utilização do método da superposição de correntes:
 - Calcular $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$ usando, respectivamente, as equações (3) e (4);
 - Projetar $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $-\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre o fasor \dot{I}_{pac-h} , encontrando-se, assim, as parcelas $\dot{I}_{s-proj-h}$ e $\dot{I}_{c-proj-h}$ que definem as contribuições advindas da fonte e da carga;
- Para o emprego do método da superposição de tensões:
 - Calcular $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ usando, respectivamente, as equações (6) e (7);
 - Projetar $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre o fasor \dot{V}_{pac-h} , encontrando-se, assim, as parcelas $\dot{V}_{s-proj-h}$ e $\dot{V}_{c-proj-h}$ que definem as contribuições advindas da fonte e da carga.

Tendo em vista que as principais normas e recomendações, nacionais e internacionais, empregam valores de referência para as tensões harmônicas, em detrimento das correntes harmônicas, isto implica que, para o momento, o estabelecimento de um procedimento direcionado à proposta defendida pelo método da superposição de tensões se mostra mais atrativo, em conformidade com o discorrido em Santos et al. (2011).

2.2 Limitações de Aplicação da Metodologia Tradicional em Campo

Muito embora a simplicidade do método em questão apresentado, vale ressaltar que um dos pontos mais complexos

para se atingir uma boa exatidão dos resultados encontra-se vinculado com a necessidade do pré- onhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e do consumidor. Vale ainda ressaltar, que se reconhece, na literatura internacional, a existência de vários processos capazes de determinar, com segurança, a impedância harmônica da concessionária, tais como: Oliveira et al. (1991), Wang et al. (2007), Xu et al. (2002) e Girgis and McManis (1989). Quanto aos métodos para a obtenção da impedância harmônica equivalente dos consumidores estes se revelam extremamente frágeis e pouco confiáveis, como demonstrado em Oliveira et al. (2009), Xu et al. (2002) e Silva and de Oliveira (2008). Situado ainda neste cenário, há de se considerar a existência de estudos orientados à identificação de cargas elétricas residenciais, tal como Fernandes et al. (2010), todavia, de pouca aplicabilidade aos objetivos aqui traçados.

Estas dificuldades, como demonstrado em Costa (2009) conduzem a resultados de compartilhamento que podem se apresentar com grandes discrepâncias numéricas e até mesmo inconsistentes com a realidade operacional do complexo sob investigação.

Diante desta conjuntura procedeu-se a investigações complementares cujo objetivo fundamental está centrado numa estratégia para contornar as dificuldades supracitadas.

3 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

A metodologia aqui discutida apoia-se no princípio da superposição de tensões, como determinado pelas equações (6) e (7), as quais evidenciam a relevância do conhecimento das impedâncias da concessionária e do consumidor.

Num primeiro momento, estabelece-se uma relação entre as impedâncias harmônicas atreladas com o supridor e consumidor, as quais muito embora ainda desconhecidas, determinam a constante complexa abaixo.

$$\dot{K}_h = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \quad (9)$$

Introduzindo esta grandeza nas expressões (6) e (7), obtém-se:

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{s-h} \quad (10)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{c-h} \quad (11)$$

Nota-se, a partir das equações (10) e (11), que as parcelas de contribuição de cada um dos agentes envolvidos para a dis-

torção harmônica de ordem h no PAC, para uma dada situação operacional, dependem exclusivamente dos valores complexos das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Portanto, para se determinar o compartilhamento de responsabilidades será suficiente o conhecimento destas correntes. À luz desta afirmativa, o procedimento aqui proposto consiste numa estratégia que se configura na inserção, no PAC, de um componente passivo que apresente uma impedância harmônica dominante sobre àquelas referidas anteriormente (\dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}). Isto orienta para a utilização de um arranjo na forma de filtro sintonizado ou outro, que contemple as propriedades aqui almeçadas.

A Fig. 6 ilustra a nova configuração do sistema com a inserção da impedância harmônica do filtro harmônico acima mencionado.

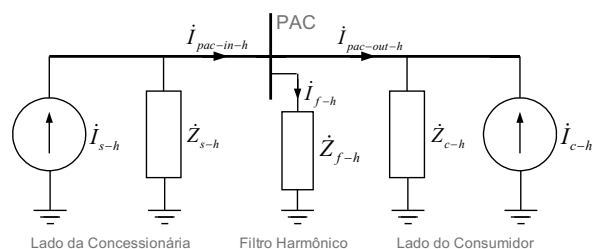


Figura 6: Arranjo físico relacionado com o Método da Superposição Modificado.

Tem-se na Fig. 6

- \dot{Z}_{f-h} : impedância harmônica equivalente do filtro para a ordem h ;
- \dot{I}_{f-h} : corrente harmônica de ordem h no filtro harmônico;
- $\dot{I}_{pac-in-h}$: corrente harmônica de ordem h a montante do PAC;
- $\dot{I}_{pac-out-h}$: corrente harmônica de ordem h a jusante do PAC.

A Fig. 7 é indicativa dos circuitos equivalentes associados com a estratégia da superposição, inserindo-se a impedância dominante supra mencionada.

Em que:

- \dot{I}_{f-s-h} : contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h} ;
- \dot{I}_{f-c-h} : contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h} .

Em vista do fato que, em se tratando de um filtro, a nova tensão harmônica de ordem h no PAC se apresentará com um valor bastante baixo, as seguintes observações são válidas:

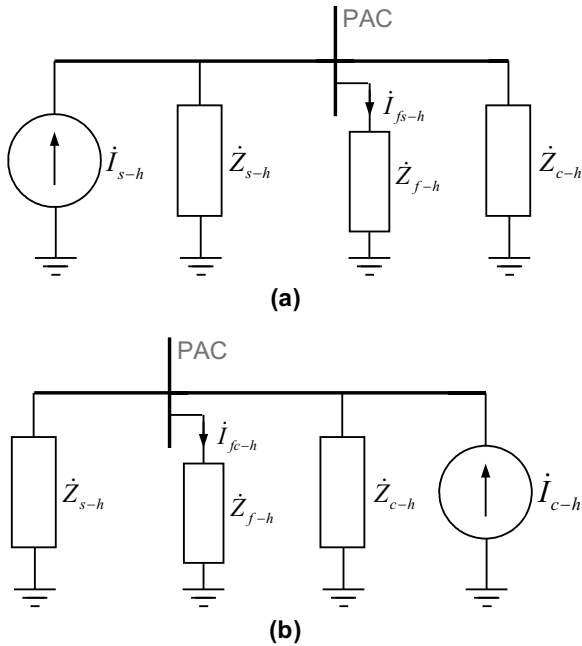


Figura 7: Determinação das contribuições harmônicas de corrente de ordem h para a corrente total do filtro.

- A impedância do filtro \dot{Z}_{f-h} é predominante sobre as demais impedâncias do sistema, isto é, esta deve ter um valor significativamente inferior às correspondentes impedâncias do supridor e do consumidor;
- Diante desta conjuntura a corrente \dot{I}_{fs-h} - Fig. 7a - é praticamente igual a \dot{I}_{s-h} ;
- Complementarmente, a corrente \dot{I}_{fc-h} - Fig. 7b - é aproximadamente igual a \dot{I}_{c-h} ;
- À luz destes fatos pode-se então escrever:

$$\dot{I}_{fs-h} \cong \dot{I}_{s-h} \cong \dot{I}_{pac-in-h} \quad (12)$$

$$\dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{c-h} \cong -\dot{I}_{pac-out-h} \quad (13)$$

Por fim, aplicando-se o princípio da superposição, tem-se que a corrente total de ordem h no filtro será:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{f-h} &= \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} = \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} \\ &= \dot{I}_{pac-in-h} + \dot{I}_{pac-out-h} \end{aligned} \quad (14)$$

Uma vez encontradas \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} , tendo em vista a aplicação da metodologia da superposição de tensões, deve-se

proceder as projeções destes fasores sobre aquele representativo da corrente total \dot{I}_{f-h} , gerando, respectivamente, as projeções $I_{fs-proj-h}$ e $I_{fc-proj-h}$. Estas componentes podem ser visualizadas na ilustração da Fig. 8.

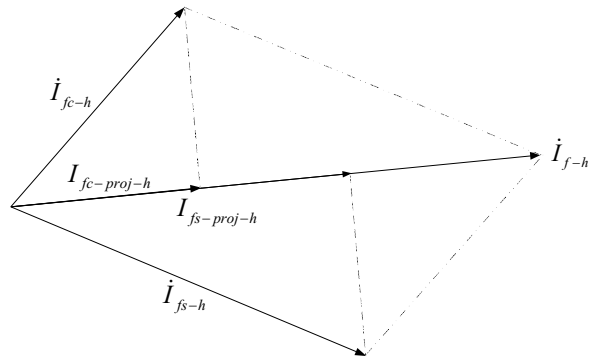


Figura 8: Decomposição da corrente do filtro em dois escalares advindos das projeções.

Na Fig. 8:

- $I_{fs-proj-h}$: projeção de \dot{I}_{fs-h} sobre \dot{I}_{f-h} ;
- $I_{fc-proj-h}$: projeção de \dot{I}_{fc-h} sobre \dot{I}_{f-h} .

Do exposto segue que o compartilhamento de responsabilidades sobre a distorção harmônica de ordem h em um PAC, em consonância com as etapas apresentadas, deve obedecer a sequência de procedimentos abaixo estabelecida para se atingir o ponto focal aqui almejado:

1. Inserção de um filtro harmônico junto ao PAC, com frequências compatíveis com as componentes harmônicas de interesse;
2. Determinação, via medição direta, as grandezas: $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$, como indicado no circuito da Fig. 6;
3. Cálculo das correntes \dot{I}_{fs-h} , \dot{I}_{fc-h} e \dot{I}_{f-h} usando, respectivamente, (12), (13) e (14);
4. Projeção dos fasores \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} sobre o \dot{I}_{f-h} ;
5. Por fim, determinação dos percentuais que definirão as parcelas de responsabilidades, empregando, para tanto, os resultados numéricos das projeções supra referenciadas.

4 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO

Para fins de avaliação da metodologia proposta, esta seção encontra-se voltada para um estudo de um caso hipotético

envolvendo um suprimento, em nível de distribuição, para dois consumidores adjacentes e responsáveis pela geração de distorções harmônicas.

4.1 Arranjo Elétrico

A Fig. 9 apresenta o arranjo em pauta, o qual, como se constata, representa uma configuração tipicamente encontrada em redes elétricas. Muito embora a simplicidade deste, o mesmo se apresenta com características próprias aos objetivos aqui delineados e, com o intuito de uma maior generalização do problema, optou-se pelo emprego de um circuito para o qual os dois consumidores, um contemplado aos fins do compartilhamento e outro perfazendo a rede de suprimento, se apresentam, operacionalmente, com características distintas, mantendo-se, todavia, a fonte representativa da concessionária como ideal.

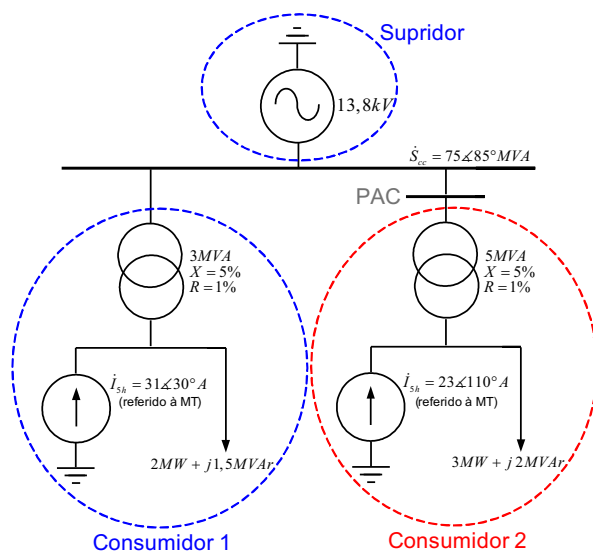


Figura 9: Arranjo elétrico adotado para os estudos computacionais de desempenho da metodologia proposta.

Como esclarece o circuito equivalente utilizado, este é composto por um suprimento ideal de 13,8 kV em 60 Hz. Portanto, no que tange à rede de alimentação, esta não possui qualquer distorção inicial, a não ser os efeitos advindos dos consumidores. As principais características atreladas com o complexo utilizado, encontram-se identificadas na própria figura, a qual evidencia que as cargas possuem natureza linear ($P+jQ$) e injeções de correntes harmônicas de ordem 5. Estas últimas, em consonância com procedimentos clássicos, são representadas por fontes de correntes e já se encontram referidas à Média Tensão (MT).

4.2 Resultados Obtidos através da Aplicação da Metodologia da Superposição Modificada

Visando-se a aplicação da metodologia, procedeu-se, em consonância com a proposta deste artigo, a inserção de um filtro sintonizado para 300 Hz, objetivando-se, assim, atingir uma impedância harmônica dominante nesta frequência.

A Tabela 1 fornece os parâmetros por fase do filtro harmônico sintonizado para a ordem 5, o qual, para a frequência fundamental, implica numa potência reativa trifásica da ordem de 2 MVar. O filtro escolhido para a presente situação se apresenta com um fator de qualidade (Das, 2002) aproximadamente de 65.

Tabela 1: Parâmetros por fase do filtro sincronizado de ordem 5 inserido no sistema.

Parâmetro	Valor
C	27,9 μF
L	10,5 mH
R	0,3 Ω

A título de ilustração, o filtro harmônico acima especificado representa, na frequência de 300 Hz, uma impedância equivalente de $0,83 \angle 68,9 \Omega$. Por outro lado, as respectivas impedâncias equivalentes da rede de suprimento e do consumidor adotados, valem, respectivamente, $12,10 \angle 88,4 \Omega$ e $162,19 \angle 74,1 \Omega$ na 5ª ordem harmônica. Isto posto resulta que, para o arranjo selecionado na frequência avaliada, a impedância do filtro é de 6,9% da impedância equivalente da concessionária e 0,5% da impedância equivalente do consumidor. Como se pode notar, a impedância do filtro em questão mostra-se, como esperado, significativamente dominante quando comparada às impedâncias do sistema suprido e/ou consumidor.

A Fig. 10, por sua vez, é indicativa do circuito equivalente de Norton para o arranjo estabelecido, incluindo o filtro. Tal figura evidencia que o consumidor 1 foi adicionado à rede de suprimento, uma vez que o PAC está definido no ponto de acoplamento do consumidor 2. Os detalhes do processo de obtenção deste arranjo unifilar equivalente são aqui omitidos por obedecerem aos procedimentos tradicionais.

Para a configuração obtida, em consonância com a proposta deste artigo, realizou-se, então, os cálculos dos percentuais de contribuição do sistema supridor equivalente (concessionária e consumidor 1) e do consumidor 2, para a distorção harmônica de 5ª ordem no ponto de acoplamento. Para tanto, procedeu-se, primeiramente, aos cálculos das correntes harmônicas de 300 Hz à montante e à jusante do PAC, assim como a corrente do filtro, obtendo-se os valores constantes na Tabela 2. É importante salientar que tais grandezas,

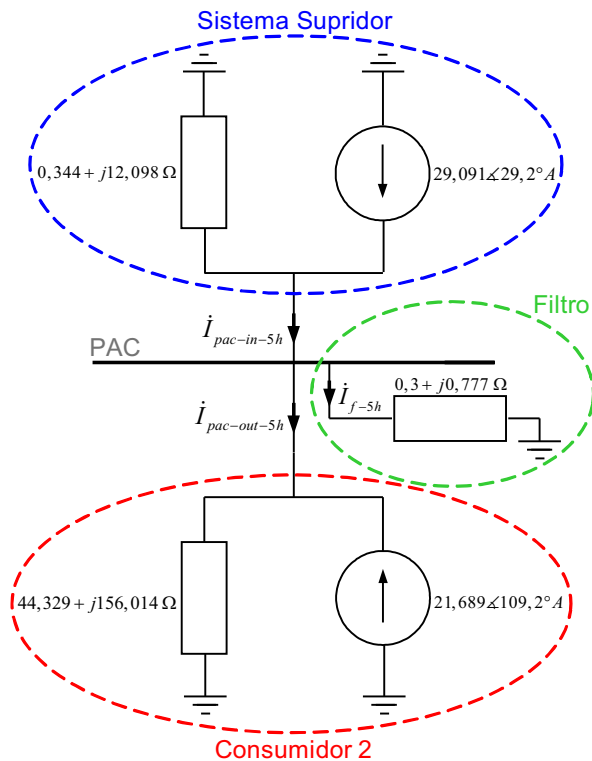


Figura 10: Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5 com a inserção do filtro sintonizado no PAC.

para complexos elétricos reais, seriam obtidas através de medições diretas mediante a inserção de impedância dominante (filtro).

Tabela 2: Correntes harmônicas - com filtro sintonizado.

Corrente	Valor
$i_{pac-in-5h}$	$26,66 \angle 27,8^\circ A$
$i_{pac-out-5h}$	$21,57 \angle -70,4^\circ A$
i_{f-5h}	$36,63 \angle 63,5^\circ A$

Empregando-se os valores das correntes harmônicas da Tabela 2, chega-se aos resultados da Tabela 3, os quais se referem diretamente aos níveis de responsabilidades entre as partes, sem que, para tal, tenha-se por conhecidas as impedâncias harmônicas equivalentes do supridor e consumidor.

Vale observar que os resultados acima devem ser considerados conjuntamente com as equações (10) e (11) visto que estas evidenciam que os percentuais das correntes estão diretamente atrelados com as responsabilidades sobre as distorções de tensões através da relação complexa \bar{K}_h . Este fato determina que, não obstante os valores indicados na Tabela 3 sejam expressos em correntes, estes percentuais são indicati-

Tabela 3: Percentuais de responsabilidade entre o sistema supridor e o consumidor - tensão harmônica de ordem 5 - Método da Superposição Modificado.

Referência	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades
Supridor	$I_{fs-proj-5h} = 21,666 A$	59,2%
Consumidor	$I_{fc-proj-5h} = 14,963 A$	40,8%

vos das parcelas de contribuições do supridor e consumidor para a distorção de tensão do PAC.

4.3 Valores Esperados para as Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

Objetivando-se agora, a obtenção dos valores esperados que se apresentariam como o “gabarito” para os valores de atribuição de responsabilidades, visto que todos os componentes e grandezas envolvidas são conhecidos, aplicou-se o método tradicional de superposição de tensões, obtendo-se o circuito equivalente de Norton da Fig. 11 - para a 5ª harmônica.

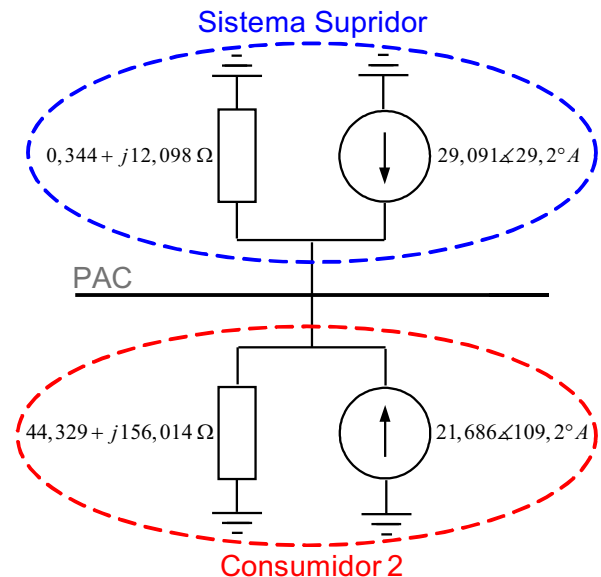


Figura 11: Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5.

Uma vez realizados os devidos cálculos visando a obtenção das parcelas de responsabilidades sobre a distorção harmônica de ordem 5 que se manifesta no PAC, a Tabela 4 apresenta os resultados derivados da aplicação do método da superposição de tensões. Tais proporções serão consideradas, conforme já mencionado, como sendo os valores esperados (valores corretos) para fins do estabelecimento de termos

comparativos com os resultados advindos do método proposto.

Tabela 4: Percentuais de responsabilidade entre o sistema supridor e o consumidor - tensão harmônica de ordem 5 - valores esperados.

Referência	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades
Supridor	$V_{s-proj-5h} = 275,308 V$	62,2%
Consumidor	$V_{c-proj-5h} = 167,103 V$	37,8%

É importante destacar que, os valores constantes na Tabela 4 foram derivados através de um procedimento matemático que exigiu o conhecimento das impedâncias envolvidas no processo, fato este já destacado como de difícil obtenção e que motivou a estratégia utilizada na Seção 4.2.

4.4 Análise Comparativa dos Resultados

Tendo-se estabelecidos os valores esperados para as responsabilidades, pode-se observar, na Tabela 5, um quadro comparativo entre os resultados provenientes da aplicação computacional da metodologia da superposição modificada e as respectivas grandezas esperadas.

Tabela 5: Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades - valores esperados versus metodologia proposta - avaliação computacional.

Percentuais de Atribuição de Responsabilidade				
Valores de Esperados		Resultados Advindos da Metodologia Proposta		Discrepâncias
Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	
62,2%	37,8%	59,2%	40,8%	3,0%

Os resultados apresentados na tabela evidenciam uma boa correlação entre os indicadores esperados e os obtidos via aplicação do Método da Superposição Modificado.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DO MÉTODO PROPOSTO

Uma vez realizados os trabalhos de cunho teórico, procede-se, nesta etapa, ao desenvolvimento de atividades relacionadas diretamente com experimentos laboratoriais, num ambiente laboratorial totalmente controlado no que tange às distorções advindas da fonte de suprimento, carga alimentada e parâmetros diversos, visando, sobretudo, a análise da consistência da metodologia proposta.

5.1 Arranjo Experimental

A estrutura física utilizada consistiu na montagem de um arranjo monofásico representativo de um supridor e dois consumidores. A concessionária foi modelada através de uma fonte programável, responsável por um suprimento praticamente senoidal. Os consumidores, como indicado na Fig. 12, encontram-se constituídos por componentes lineares e não lineares. Vale ressaltar, mais uma vez que, um deles (consumidor 1), para fins deste trabalho, deve ser visto como integrante da rede de suprimento, conforme ocorre para as instalações reais. O outro (consumidor 2) constitui-se naquele para o qual deseja-se determinar as parcelas de contribuição para as distorções harmônicas junto ao ponto de acoplamento com a rede de suprimento.

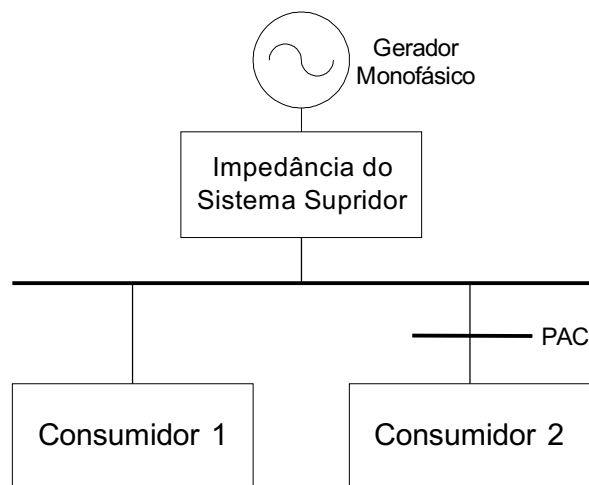


Figura 12: Estrutura física do arranjo experimental empregado para avaliação do desempenho da metodologia da superposição modificada.

O arranjo físico, em seus pormenores, encontra-se apresentado na Fig. 13, a qual realça os componentes empregados e seus principais parâmetros.

Pode-se notar, na figura anterior, que alguns parâmetros representativos das cargas dos consumidores 1 e 2 não se encontram quantitativamente especificados. Isto se deve ao fato de que os mesmos são alterados para os diversos casos estudados, conforme será posteriormente esclarecido. Quanto a carga não linear representada pelo reator saturado, este possui: tensão nominal de 63,5V, potência nominal de 583,3VA e frequência de 60Hz.

Objetivando a representação da concessionária ideal utilizou-se de um gerador programável HP, modelo 6834A, potência 4500VA. Tal equipamento foi ajustado para a produzir uma tensão eficaz de 100V em 60Hz.

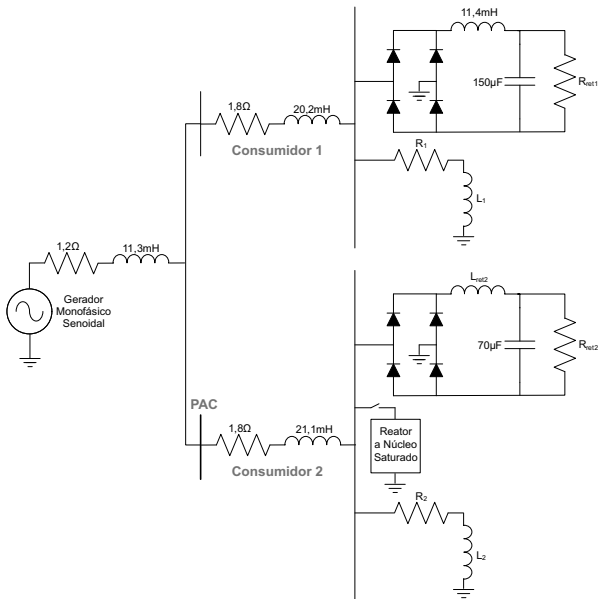


Figura 13: Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia da superposição modificada.

Para a realização das diversas medições requeridas para a aplicação do método aqui focado, os registros das distorções harmônicas totais e individuais foram feitos através do equipamento RMS Marh 21.

O arranjo elétrico implementado, no que tange a sua estrutura física, pode ser observado na Fig. 14.

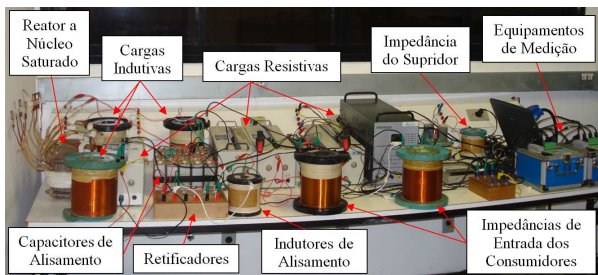


Figura 14: Arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia proposta.

Uma vez realizada a montagem e feitas as primeiras medições, ficou então caracterizado que, dentre as componentes harmônicas presentes, a de ordem 3 se mostrou dominante. Isto se deve, sobretudo, aos tipos de cargas não lineares empregadas nos experimentos. À luz deste fato, esta passou a ser a frequência considerada como foco dos testes, e, portanto, a impedância paralela dominante proposta foi um filtro harmônico sintonizado para a frequência de 180 Hz, cujos parâmetros são destacados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros do filtro harmônico sintonizado de frequência de 180Hz.

Parâmetro	Valor
C_f	68,85μF
L_f	11,37mH
R_f	1,2Ω

Uma vez estabelecido o arranjo físico base, foram então realizados diversos experimentos, objetivando-se atingir um número de casos que contemplasse diferentes perfis de compartilhamento de responsabilidades. Para tanto, conforme já dito, foram necessárias alterações de alguns dos parâmetros, sem, contudo, alterar a topologia do arranjo apresentado. Do total de experimentos realizados, foram selecionados 4 (quatro) casos para a apresentação, discussão e análise. Os mesmos encontram-se detalhados na sequência.

5.2 Casos Estudados

Os quatro casos adotados para fins deste trabalho, os quais serão sempre reportados à avaliação do desempenho do processo de compartilhamento das responsabilidades das distorções harmônicas junto ao PAC - ponto de acoplamento do consumidor 2, que será denominado, daqui por diante, apenas por Consumidor, visto que o consumidor 1 passará a compor a rede de suprimento - são:

- Caso 1: consumidor com carga não linear fortemente dominante;
- Caso 2: consumidor com carga não linear dominante;
- Caso 3: sistema supridor com carga não linear dominante;
- Caso 4: sistema supridor com carga não linear fortemente dominante.

A Tabela 7 apresenta, para os casos avaliados, os parâmetros dos componentes atrelados ao arranjo elétrico constante da Fig. 13.

5.3 Resultados Obtidos através da Aplicação da Metodologia da Superposição Modificada

Realizando-se a inserção da já definida impedância dominante no PAC (filtro harmônico sintonizado) e procedendo-se as medições necessárias à aplicação da metodologia, observa-se, na Tabela 8, as correntes de 3ª ordem harmônica necessárias ao processo em questão.

Tabela 7: Parâmetros dos arranjos físicos usados nos experimentos.

Parâmetro	Casos Estudados			
	1	2	3	4
R_1	74,4Ω	87,5Ω	87,5Ω	91,5Ω
L_1	61,8mH	21,3mH	21,3mH	0
R_{ret1}	15,6Ω	10,0Ω	15,6Ω	15,6Ω
R_2	91,5Ω	91,5Ω	91,5Ω	74,4Ω
L_2	0	0	0	61,8mH
L_{ret2}	3,2mH	10,3mH	10,3mH	10,3mH
R_{ret2}	20,4Ω	20,4Ω	20,4Ω	20,4Ω
Reator a Núcleo Saturado	Conectado ao Consumidor 2	Conectado ao Consumidor 2	Desconectado	Conectado ao Consumidor 1

Tabela 8: Correntes medidas - com inserção do filtro harmônico.

Caso	$I_{pac-in-3h}$	$I_{pac-out-3h}$	I_f-3h
1	301,650±176,2° mA	563,013±137,7° mA	415,582±73,9° mA
2	197,267±159,1° mA	391,968±142,8° mA	210,120±52,5° mA
3	408,050±176,4° mA	293,858±23,8° mA	691,248±192,0° mA
4	823,590±14,8° mA	620,251±27,0° mA	560,103±63,6° mA

Fundamentando-se nos valores indicados na tabela anterior e utilizando-se do Método da Superposição Modificado para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, obtêm-se os percentuais fornecidos na Tabela 9.

Tabela 9: Percentuais de responsabilidade entre o sistema supridor e o consumidor - Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções		Parcelas de Responsabilidade	
	$I_{fs-proj-3h}$	$I_{fc-proj-3h}$	Supridor	Consumidor
1	-64,110 mA	479,687 mA	11,8%	88,2%
2	-167,940 mA	378,058 mA	30,8%	69,2%
3	403,600 mA	287,648 mA	58,4%	41,6%
4	542,136 mA	17,968 mA	96,8%	3,2%

5.4 Valores Esperados para as Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

Os fundamentos dos procedimentos empregados para a obtenção dos valores esperados para as parcelas de responsabilidades, uma vez conhecidos todos os parâmetros e grandezas impostas pelos experimentos realizados, foram os mesmos já utilizados quando do tratamento teórico do assunto. Diante disto, obteve-se os resultados destacados na Tabela 10, os quais refletem as correntes e tensões harmônicas de ordem 3 medidas em laboratório no PAC para os quatro casos avaliados, sem a inclusão do filtro.

Tendo como conhecidas as impedâncias do sistema supridor e do consumidor, via medições laboratoriais, e medidas as correntes e a tensões harmônicas no PAC, utilizando-se das equações (1) e (2), é possível determinar as impedâncias e

Tabela 10: Correntes e tensões harmônica de ordem 3 - medição - filtro harmônico desconectado.

Caso	I_{pac-3h}	V_{pac-3h}
1	413,277±146,6° mA	3,670±8,4° V
2	300,190±145,3° mA	1,510±7,9° V
3	134,745±32,2° mA	4,662±94,1° V
4	587,191±21,0° mA	3,986±6,7° V

as fontes de correntes harmônicas equivalentes do circuito de Norton para cada caso estudado, tal como evidenciado na Tabela 11.

Tabela 11: Impedâncias e fontes de correntes harmônicas equivalentes de ordem 3.

Caso	Equivalente Supridor		Equivalente Consumidor	
	Z_{s-3h}	I_{s-3h}	Z_{c-3h}	I_{c-3h}
1	11,774±81,5° Ω	333,181±179,9° mA	96,303±14,3° Ω	436,436±33,0° mA
2	11,943±78,9° Ω	225,827±159,3° mA	96,303±14,3° Ω	306,839±32,7° mA
3	11,943±78,9° Ω	317,711±174,2° mA	96,303±14,3° Ω	151,777±136,0° mA
4	12,196±77,8° Ω	661,232±8,6° mA	120,03±50,6° Ω	573,919±204,0° mA

A partir das informações anteriores torna-se possível calcular os valores esperados para as parcelas de responsabilidades do consumidor e do supridor para cada um dos casos considerados, como indicado na Tabela 12.

Tabela 12: Correntes e tensões harmônica de ordem 3 - medição - filtro harmônico desconectado.

Caso	Resultado das Projeções		Parcelas de Responsabilidade	
	$V_{s-proj-3h}$	$V_{c-proj-3h}$	Supridor	Consumidor
1	0,513 V	3,157 V	14,0%	86,0%
2	-1,508 V	3,018 V	33,3%	66,7%
3	2,942 V	1,721 V	63,1%	36,9%
4	3,682 V	0,304 V	92,4%	7,6%

5.5 Análise Comparativa dos Resultados

A Tabela 13 apresenta uma síntese dos resultados provenientes dos trabalhos experimentais, em que pese a correlação entre a atribuição de responsabilidades através dos princípios estabelecidos pelo método proposto e os valores esperados para as grandezas.

Tabela 13: Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades - valores de esperados versus metodologia proposta - avaliação experimental.

Caso Experimental	Percentuais de Atribuição de Responsabilidade				Discrepâncias
	Valores Esperados		Resultados Advindos da Metodologia Proposta		
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	
1	14,0%	86,0%	11,8%	88,2%	2,2%
2	33,3%	66,7%	30,8%	69,2%	2,5%
3	63,1%	36,9%	58,4%	41,6%	4,7%
4	92,4%	7,6%	96,8%	3,2%	4,4%

À luz destes resultados numéricos fica latente que os percentuais de atribuição de responsabilidades, advindos da aplicação do método da superposição clássico e aqueles derivados da metodologia da superposição modificada, se apresentam com uma boa correlação de valores, fato este que ratifica o processo proposto para os fins aqui delineados.

Vale mais uma vez enfatizar que os indicativos contemplados e referidos como valores esperados e utilizados como base comparativa para a validação do método de compartilhamento proposto neste trabalho, somente foram possíveis de determinação pelo fato que os parâmetros e demais grandezas representativas do arranjo estabelecido foram integralmente pré-definidas e aferidas num ambiente laboratorial controlado. É importante reconhecer que, em se tratando de aplicações industriais ou outras, tais informações seriam de difícil acesso ou mesmo impossíveis de serem obtidas. Portanto, nestas condições, apenas os resultados do método proposto seriam disponibilizados.

Por fim, vale ainda ressaltar, que diferentes estratégias podem ser elencadas para fins de obtenção da impedância dominante. Entre outras, pode-se destacar estratégia fundamentadas na inserção de filtros harmônicos passivos de segunda e terceira ordem e tipo C. Tais estudos serão foco de investigação em estudos futuros, assim como, seus custos, limitações e desempenhos. Neste particular vale observar que, estudos preliminares, apontam para o fato que as potências dos componentes dos filtros não precisam ser, necessariamente, compatíveis com os carregamentos das cargas dos consumidores em pauta (Santos, 2011).

6 CONCLUSÕES

O presente artigo contemplou uma temática de grande relevância na atualidade, a qual encontra-se relacionada com as determinações contidas nos procedimentos normativos associados com a qualidade do produto, como previsto no PRODIST - ANEEL e nas orientações do ONS. De modo pontual, o assunto em voga, refere-se à questão do compartilhamento das responsabilidades entre um agente supridor e um consumidor no que tange as distorções harmônicas em um PAC. Neste cenário, foram sintetizados os principais pontos associados com as propostas encontradas na literatura, as quais, de um modo geral, se fundamentam nos princípios da superposição de efeitos. Como ressaltado no texto, muito embora a praticidade e simplicidade dos procedimentos classicamente estabelecidos, a utilização dos mesmos encontra grandes dificuldades quando da obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos. De fato, como reportado, imprecisões vinculadas às impedâncias equivalentes conduzem a erros bastante significativos para os resultados dos compartilhamentos, fato este que determina a ineficácia do pro-

cesso, nos termos atuais, para os propósitos almejados. À luz destas constatações, este trabalho propôs uma alternativa para contornar os problemas apresentados. Neste sentido surgiu a ideia da inserção, junto ao ponto de acoplamento entre a fonte e a carga, de uma impedância dominante sobre as demais. Através desta estratégia e de uma formulação desenvolvida para se atingir o almejado compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, procedeu-se a aplicação do processo, de forma teórica, para um sistema hipotético, cujos resultados se mostraram, num primeiro momento, bastante atrativos. Visando consubstanciar os estudos, trabalhos experimentais foram conduzidos e, mais uma vez, a metodologia proposta revelou uma boa correlação entre os resultados esperados e obtidos. Nestes termos, o Método da Superposição Modificado apresentou um desempenho computacional e experimental bastante promissor para os fins a que se destina. Naturalmente, há de se considerar que os indicativos até então obtidos foram fundamentados em cálculos teóricos e em ambientes controlados e não em trabalhos de campo, fato este que orienta, inevitavelmente, a necessidade de estudos complementares até que a proposta possa ser considerada efetivamente como um mecanismo adequado aos propósitos aqui postos.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos à CAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte financeiro concedido através das bolsas de estudos e outros, e à Universidade Federal de Uberlândia, que disponibilizou sua estrutura para a realização da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2010). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema nacional - PROEDIST: Módulo 8 - qualidade da energia elétrica, *Technical report*, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, Brasil.
- Arrillaga, J. and Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, England, UK.
- Caramia, P., Capinelli, G. and Verde, P. (2009). *Power Quality Indices in Liberalized Markets*, Wiley, England, UK.
- Costa, F. H. (2009). *Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas*, Master's thesis, UFU, Uberlândia - MG.
- Cristaldi, L. and Ferrero, A. (1995). Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power qua-

- lity, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **44**(3): 683–685.
- Das, J. C. (2002). *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*, Marcel Dekker, New York, USA.
- Emanuel, A. E. (1999). Harmonic cost allocation: a difficult task, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999*, Vol. 1, pp. 333–338.
- EN 50160, . (1996). Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, *Technical report*, European Standard.
- Fernandes, R. A. S., Silva, I. N. and Oleskovicz, M. (2010). Identificação de cargas lineares e não-lineares em sistemas elétricos residenciais usando técnicas para seleção de atributos e redes neurais artificiais, *SBA - Controle & Automação* **21**(4): 389–405.
- Girgis, A. A. and McManis, R. B. (1989). Frequency domain techniques for modeling distribution or transmission networks using capacitor switching induced transients, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(3): 1882–1890.
- Hartana, R. K. and Richards, G. G. (1990). Harmonic source monitoring and identification using neural networks, *IEEE Transactions on Power Systems* **5**(4): 1098–1104.
- IEC 61000-3-6, . (1996). Electromagnetic compatibility (emc) - part 3: Limits - section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in mv and hv power systems, *Technical report*, Basic EMC publication.
- IEEE 519, . (1992). Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems, *Technical report*, IEEE Standard.
- Lin, W.-M., Lin, C.-H., Tu, K.-P. and Wu, C.-H. (2005). Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(3): 2166–2173.
- Ma, H. and Girgis, A. A. (1996). Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a kalman filter, *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(3): 1659–1665.
- Mazumdar, J., Harley, R. G., Lambert, F. C., Venayagamoorthy, G. K. and Page, M. L. (2008). Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network, *IEEE Transactions on Industry Applications* **44**(5): 1477–1485.
- Oliveira, A., Oliveira, J. C., Resende, J. W. and Miskulin, M. S. (1991). Practical approaches for ac system harmonic impedance measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery* **6**(4): 1721–1726.
- Oliveira, J. C., Silva, S. F. P., Santos, I. N. and Costa, F. H. (2009). A case study of sharing the harmonic voltage distortion responsibility between the utility and the consumer, *Renewable Energies and Power Quality Journal* (7): 327.
- ONS (2010). Procedimentos de rede: Submódulo 2.8 - gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica, *Technical report*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil.
- Peretto, L., Sasdelli, R. and Tinarelli, R. (2003). A statistical model for estimating the trend of electrical quantities in power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **52**(4): 1143–1147.
- Santos, I. N. (2011). *Uma Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas através do Princípio da Superposição*, PhD thesis, UFU, Uberlândia - MG.
- Santos, I. N., de Oliveira, J. C. and de Paula Silva, S. F. (2011). Critical evaluation of the performance of the method of harmonic power flow to determine the dominant source of distortion, *IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina)* **9**(5): 740–746.
- Silva, S. F. P. and de Oliveira, J. C. (2008). The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study, *Electric Power Systems Research* **78**(11): 1959–1964.
- Srinivasan, D., Ng, W. S. and Liew, A. C. (2006). Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification, *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**(1): 398–405.
- Srinivasan, K. (1996). On separating customer and supply side harmonic contributions, *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(2): 1003–1012.
- Srinivasan, K. and Jutras, R. (1998). Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **13**(1): 212–217.
- Swart, P. H., van Wyk, J. D. and Case, M. J. (1996). On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks, *European Transactions on Electrical Power* **6**(6): 391–396.

- Tanaka, T. and Akagi, H. (1995). A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits, *IEEE Transactions on Power Delivery* **10**(4): 1737–1742.
- Wang, W., Nino, E. and Xu, W. (2007). Harmonic impedance measurement using a thyristor-controlled short circuit, *IET Generation, Transmission Distribution* **1**(5): 707–713.
- Xu, W., Ahmed, E. E., Zhang, X. and Liu, X. (2002). Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(1): 210–216.
- Xu, W. and Liu, Y. (1999). A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999*, Vol. 1, pp. 361–366.
- Xu, W. and Liu, Y. (2000). A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling, *IEEE Transactions on Power Delivery* **15**(2): 804–811.
- Yu, K. K. C., Watson, N. R. and Arrillaga, J. (2005). An adaptive kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(2): 1577–1584.