



**XXI SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS UTILIZANDO O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO**

**Ivan Nunes Santos(*)
UFU**

**José Carlos de Oliveira
UFU**

**José Rubens Macedo Junior
UFU**

RESUMO

Diante das orientações contidas em documentos recentemente aprovados pela ANEEL (Procedimentos de Distribuição) que contempla, dentre outros indicadores de qualidade da energia elétrica, a temática das distorções harmônicas. E reconhecendo que as soluções mitigadoras para a 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. Neste contexto, o presente trabalho encontra-se centrado numa proposição que viabilize meios para se chegar a uma estratégia segura e eficaz de compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções harmônicas presente no sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE

Compartilhamento de Responsabilidades, Distorções Harmônicas, Detecção de Fontes Harmônicas, Princípio da Superposição, Qualidade da Energia Elétrica

1.0 - INTRODUÇÃO

Tendo em vista a regulamentação nacional (PRODIST) voltada para a definição de valores de referência dos indicadores de qualidade da energia elétrica (1), em que pese a presença das distorções harmônicas, torna-se relevante a disponibilização de meios que conduzam a uma identificação da origem dos fenômenos responsáveis pela deteriorização dos suprimentos elétricos. De fato, normas e recomendações têm procurado estabelecer limites para as grandezas que caracterizam os desvios das tensões, buscando manter os padrões de qualidade da energia elétrica em patamares aceitáveis. De modo particular, as distorções harmônicas têm ocupado uma relevante posição no cenário global dos indicadores de qualidade.

De um modo geral, as normas e diretrizes estabelecidas pelas agências reguladoras estabelecem os valores de referência para as distorções totais e individuais de tensões. Não obstante este procedimento clássico, vale lembrar que algumas recomendações também contemplam valores limitantes para as correntes harmônicas, a exemplo do IEEE Standard 519 (2), EN 50160 (3) e IEC 61000-3-6 (4).

Muito embora os documentos existentes contemplem questões atreladas com valores, formas de medição, protocolos, etc., praticamente não há menções sobre quaisquer mecanismos voltados para a identificação da origem das distorções, isto é, dos percentuais de contribuição a serem atribuídos à empresa supridora e ao consumidor em foco. Este assunto assume importância à medida que as soluções mitigadoras certamente possuem custos de implantação e a responsabilidade financeira de tais procedimentos poderia gerar controvérsias entre as partes envolvidas. De fato, uma vez constatada uma violação dos limites preconizados para uma dada avaliação junto ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre as partes, é de suma relevância o emprego de um procedimento sistematizado para a identificação das parcelas de responsabilidades de cada agente.

Reconhecendo a relevância da natureza, valores e origem dos fenômenos, fica pois evidenciada a necessidade de disponibilização de métodos confiáveis e seguros que conduzam a um consenso sobre as questões em pauta.

Dentre as possibilidades apontadas na literatura para identificação das responsabilidades, uma das propostas mais difundidas encontra-se fundamentada em um conceito básico da análise de circuitos elétricos, a saber, o princípio da superposição. O emprego de tal procedimento pode ser identificado em trabalhos (5)(6) inicialmente conduzidos sob a coordenação do pesquisador Wilsun Xu do Canadá, os quais foram posteriormente discutidos, avaliados e criticados pelos autores deste artigo (7)(8).

Inserido neste contexto e utilizando as bases acima mencionadas, este trabalho se propõe a explorar o procedimento tradicionalmente estabelecido, o qual emprega o princípio da superposição de correntes e, complementarmente, detalhar o princípio da superposição de tensões. Não obstante a simplicidade dos métodos sob análise vale ressaltar que um dos pontos mais complexos para a aplicação prática do processo está na necessidade do pré-conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e, de modo especial, do consumidor. Uma vez apontadas as limitações aplicativas do procedimento, este trabalho avança no sentido de propor uma metodologia que possibilite a aplicação prática do processo da superposição, com destaque a uma proposta para contornar as dificuldades inerentes às indefinições relacionadas com as mencionadas impedâncias equivalentes.

Diante do exposto, este artigo está direcionado para os seguintes pontos focais:

- Considerações sobre os métodos originais que utilizam o princípio da superposição de correntes e tensões harmônicas no PAC, em consonância com Xu;
- Proposição de um procedimento que possibilite a aplicação da metodologia da superposição sem que haja necessidade do prévio conhecimento da impedâncias equivalentes do sistema suprido e/ou do consumidor;
- Avaliação de desempenho da metodologia proposta.

2.0 - METODOLOGIA DA SUPERPOSIÇÃO

A Figura 1 caracteriza uma configuração genérica e representativa de um sistema elétrico visto a partir do ponto de acoplamento comum entre o supridor e o consumidor. Nesta figura, o consumidor é representado por cargas lineares e não-lineares, enquanto o sistema da concessionária, é simplificada e indicado através de um complexo não detalhado que compreende suas partes básicas constituintes.

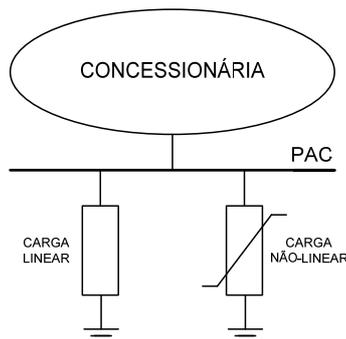


FIGURA 1 – Representação de um sistema elétrico a partir do PAC

O arranjo físico apresentado pode ser melhor observado a partir de seu circuito equivalente de Norton, conforme mostrado na Figura 2. Esta é uma técnica de modelagem no domínio da frequência e cada ordem harmônica é, genericamente, representada por h .

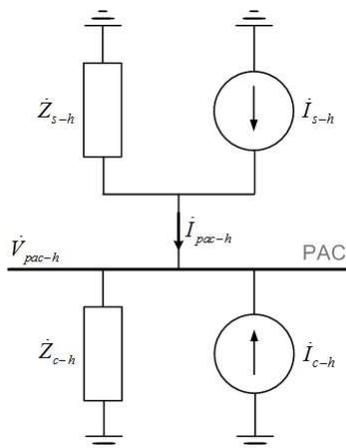


FIGURA 2 – Circuito equivalente de Norton do sistema elétrico para uma dada ordem harmônica h

Nesta figura:

\dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} - Respectivamente, impedância harmônica equivalente da concessionária e do consumidor para a ordem h ;

\dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} - Respectivamente, corrente harmônica de ordem h produzida pela concessionária e 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), derivadas do circuito equivalente de Norton, 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, como já ressaltado, por meio do princípio da superposição. Os circuitos relacionados com esta estratégia de análise podem ser visualizados nas Figuras 3(a) e (b). A primeira esclarece sobre a configuração destinada a determinação das contribuições advindas do circuito da concessionária (para a corrente total e para a tensão total) e a segunda está associada com as contribuições provenientes do consumidor.

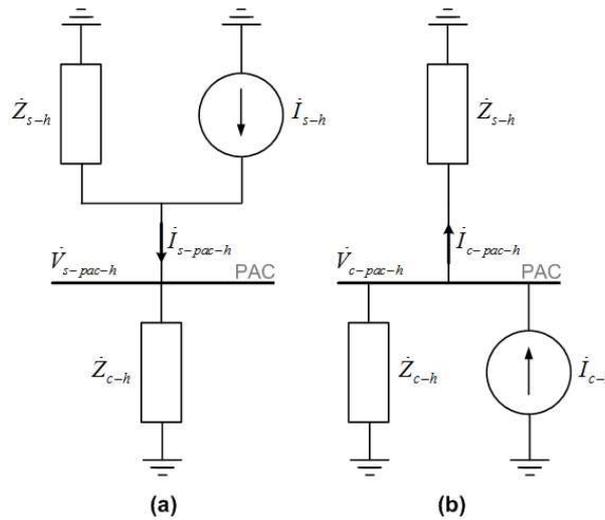


FIGURA 3 – Circuitos equivalentes para a determinação das contribuições harmônicas individuais de corrente e de tensão no PAC para a ordem harmônica h

Tem-se na Figura 3:

$\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$ - Respectivamente, contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária e do consumidor para a corrente total \dot{I}_{pac-h} ;

$\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ - Respectivamente, contribuição de tensão harmônica de ordem h da concessionária e 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 Método 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 (5) 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 ($\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da corrente total (\dot{I}_{pac-h}). Estas projeções estão evidenciadas na Figura 4.

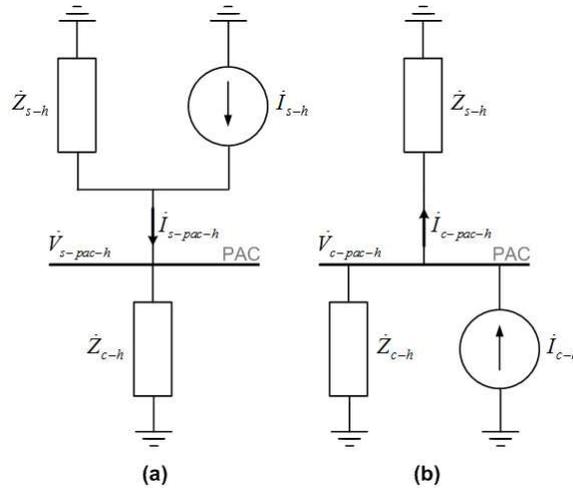


FIGURA 4 – Decomposição da corrente PAC em dois escalares advindos das projeções

Onde $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ são, respectivamente, as projeções de $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $-\dot{I}_{c-pac-h}$ 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. A seguir será apresentado um procedimento semelhante, contudo voltado para o compartilhamento das distorções harmônicas de tensão.

2.2 Método da Superposição de Tensões

As contribuições para a tensão harmônica total no PAC podem ser determinadas através das equações (6) e (7).

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

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

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 Figura 5.

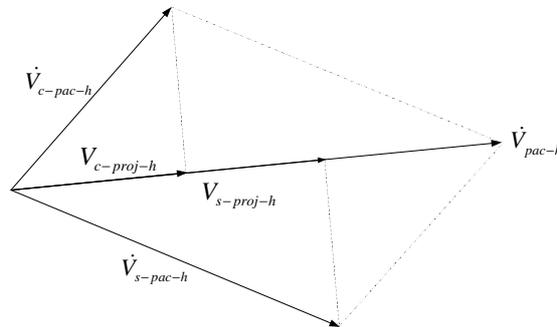


FIGURA 5 – Decomposição da tensão PAC em dois escalares advindos das projeções

Em que, $V_{s-proj-h}$ e $V_{c-proj-h}$ são, respectivamente, as projeções de $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .

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. Entretanto, muito embora a simplicidade do método em questão, vale ressaltar que um dos pontos mais complexos para se atingir uma boa exatidão dos resultados encontra-se vinculado com a necessidade do pré-conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e do consumidor. Esta dificuldade, como demonstrado em (9), pode conduzir a resultados de compartilhamento com grande erros. Diante desta conjuntura procedeu-se a investigações complementares cujo objetivo fundamental está centrado numa estratégia para contornar as dificuldades supra relacionadas.

3.0 - MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO VIA INSERÇÃO DE IMPEDÂNCIA DOMINANTE

A metodologia apoia, como já dito, 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. A relação entre as impedâncias, nos termos indicados pelas equações, origina 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 distorção harmônica total 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 realizar o compartilhamento de responsabilidades será suficiente o conhecimento destas correntes, ou mesmo, a relação de proporcionalidade entre as mesmas. À luz desta afirmativa, o procedimento aqui proposto consiste numa estratégia bastante simples, a qual se configura na inserção, no PAC, de um componente passivo que apresente como uma impedância harmônica conhecida e 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, que contemple as propriedades aqui almejadas.

A Figura 6 ilustra a nova configuração do sistema com a inserção da impedância do filtro harmônico selecionado.

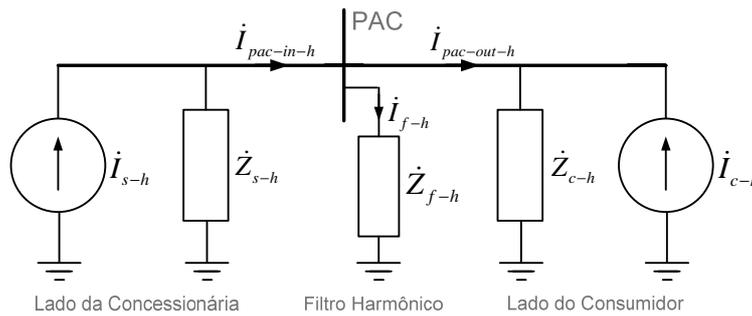


FIGURA 6 – Arranjo físico relacionado com o método da superposição modificado

Tem-se na Figura 6:

\dot{Z}_{f-h} - Impedância harmônica equivalente do filtro para a ordem h ;

\dot{I}_{f-h} - Corrente harmônica de ordem h drenada pelo filtro harmônico;

$\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$ - Respectivamente, corrente harmônica de ordem h à montante e à jusante do PAC.

Procedendo-se a aplicação do princípio da superposição, tem-se como resultado a Figura 7.

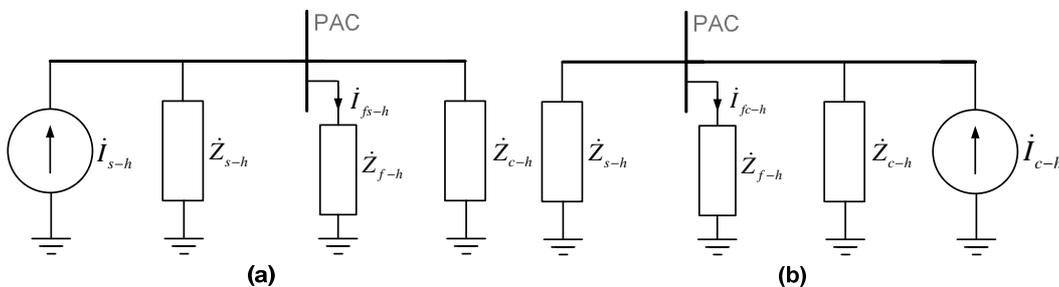


FIGURA 7 – Determinação das contribuições harmônicas de corrente de ordem h para a corrente total do filtro

Em que \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} são, respectivamente, as contribuições de corrente harmônica de ordem h da concessionária e do consumidor para corrente total 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:

- A impedância do filtro \dot{Z}_{f-h} é predominante sobre as demais impedâncias do sistema;
- Diante desta conjuntura a corrente \dot{I}_{fs-h} – Figura 7a – é praticamente igual a \dot{I}_{s-h} ;
- Complementarmente, a corrente \dot{I}_{fc-h} – Figura 7b – é aproximadamente igual a \dot{I}_{c-h} ;
- À luz destes fatos pode-se então escrever:

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

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

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

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

Uma vez encontradas \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} , estas serão também proporcionais às correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , tendo em vista a aplicação da metodologia da superposição de tensões, deve-se proceder, então, as projeções destes fasores sobre aquele representativo da corrente total \dot{I}_{f-h} , gerando, respectivamente, as projeções $\dot{I}_{fs-proj-h}$ e $\dot{I}_{fc-proj-h}$. Estas projeções são, conforme já afirmado, proporcionais àquelas atreladas com a metodologia da superposição de tensões. Do exposto segue que o compartilhamento de responsabilidades sobre a distorção de ordem h em um PAC deve obedecer a sequência de procedimentos abaixo estabelecida para se atingir o ponto focal aqui almejado:

1. Inserir um filtro harmônico de ordem h junto ao PAC, com frequências de sintonia compatíveis com as componentes harmônicas de interesse;
2. Determinar, por medição, as grandezas: $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$.
3. Calcular \dot{I}_{fs-h} , \dot{I}_{fc-h} e \dot{I}_{f-h} usando, respectivamente, (12), (13) e (14).
4. Projetar os fasores \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} sobre o \dot{I}_{f-h} .
5. Por fim, determinar os percentuais que definirão as parcelas de responsabilidades, empregando, para tanto, os resultados numéricos das projeções supra referenciadas.

4.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para fins de avaliação da metodologia proposta, esta seção encontra-se voltada para um estudo de um caso hipotético envolvendo um suprimento, à nível de distribuição, para dois consumidores adjacentes, com cargas não-lineares de mesma natureza (retificadores trifásicos) e responsáveis pela geração de distorções harmônicas. A Figura 8 apresenta o arranjo em pauta, o qual, como se constata, representa uma configuração tipicamente encontrada em redes elétricas. Muito embora a simplicidade da configuração, a mesma se apresenta com características próprias aos objetivos aqui delineados.

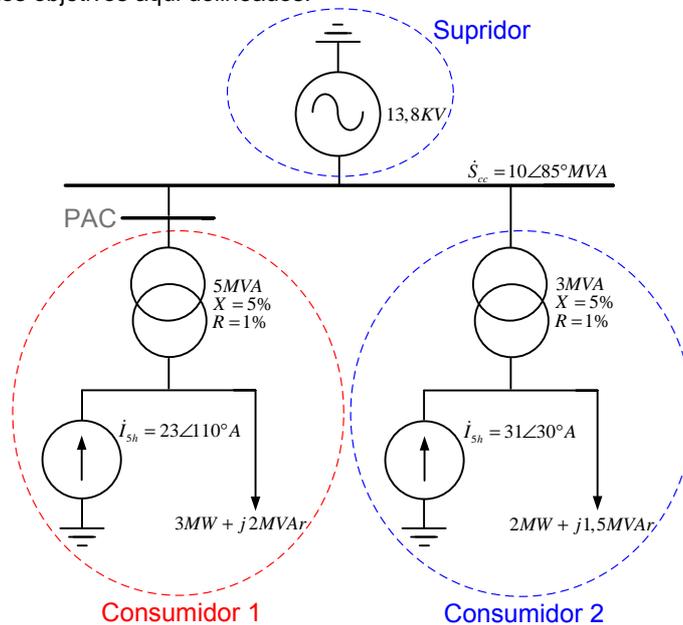


FIGURA 8 – Arranjo elétrico para estudos de desempenho da metodologia proposta

Como esclarece o circuito equivalente utilizado, este é composto por um suprimento ideal de 13,8 kV em 60Hz, portanto, no que tange a rede de alimentação, esta não possui qualquer distorção inicial a não ser os efeitos advindos dos consumidores. Quanto aos consumidores 1 e 2, estes são conectados ao barramento de média tensão por meio de transformadores. 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, para o caso, definida pela componente de ordem 5. Estas últimas, em consonância com procedimentos clássicos, são representadas por fontes de correntes.

Objetivando a aplicação do método da superposição de tensões e tendo por base os princípios apresentados, o circuito equivalente de Norton, para a ordem harmônica sob análise, encontra-se indicado na Figura 9. Esta evidencia que o consumidor 2 foi composto com a rede de suprimento, um vez que o PAC está definido no ponto de acoplamento do consumidor 1. Os detalhes do processo de obtenção do arranjo equivalente são aqui omitidos por obedecerem aos procedimentos tradicionais atrelados com circuitos elétricos.

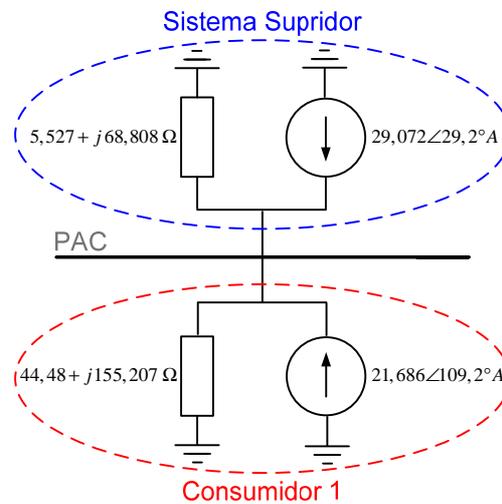


FIGURA 9 – Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5

A Tabela 1 apresenta os resultados derivados da aplicação do método da superposição de tensões. Tais proporções serão tratadas como valores de referência para a utilização de qualquer procedimento posterior para a detecção das parcelas de responsabilidades.

Tabela 1 - Percentuais de Responsabilidade entre o Sistema Supridor e o Consumidor – Tensão Harmônica de Ordem 5 – Valores de Referência

Referência	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidade
Supridor	$V_{s-proj-5h} = 1183,597 V$	62,21%
Consumidor	$V_{c-proj-5h} = 719,058 V$	37,79%

Para se atingir os resultados anteriores, vale lembrar a necessidade de informações de grande relevância ao processo do compartilhamento nos termos estabelecidos. São elas: as impedâncias equivalentes para a concessionária e consumidores e as distorções harmônicas de tensão e de corrente no PAC para cada ordem harmônica sob consideração. O pré conhecimento das impedâncias harmônicas para os sistemas reais, tanto no que se refere à concessionária como o consumidor, constitui-se na maior dificuldade de aplicação do processo clássico nos termos acima esclarecidos.

Em vista das incertezas das impedâncias harmônicas supra referidas, o método aqui proposto, fundamentado na instalação de um filtro sintonizado ou de uma impedância harmônica dominante para a frequência sob análise, conduziu a inserção, no circuito sob análise, de um filtro selecionado para 300 Hz. Este, de fato, possui duas funções para o arranjo. Uma primeira vinculada com a correção do fator de potência e outra ao processo de filtragem propriamente dita. Para a nova configuração obtida, com consonância com a proposta deste artigo, procedeu-se, então, aos cálculos dos percentuais de contribuição do sistema supridor equivalente (concessionária e consumidor 2) e o consumidor 1.

O filtro harmônico foi sintonizado para a ordem 5 por meio de um circuito série contendo um capacitor de 27,8μF, um indutor de 10,2mH e um resistor de 1,28Ω.

Procedendo a novos cálculos sobre as correntes harmônicas de 300 Hz à montante e à jusante do PAC, obtêm-se os valores constantes na Tabela 2. Tais valores, para situações reais, seriam obtidos através de medições diretas.

Tabela 2 - Correntes Encontradas no Sistema após a Inserção do Filtro Sintonizado

Parâmetro	Valor
$\dot{I}_{pac-in-5h}$	$28,559 \angle 30,2^\circ A$
$\dot{I}_{pac-out-5h}$	$21,81 \angle -70,1^\circ A$
\dot{I}_{f-5h}	$38,915 \angle 63,7^\circ A$

Empregando-se os valores das correntes harmônicas anteriores, as quais seriam utilizadas para o atendimento às

etapas descritas na seção anterior, chega-se, mesmo havendo o desconhecimento das impedâncias equivalentes do sistema supridor e do consumidor, aos resultados da Tabela 3. Os valores encontrados, que representam as parcelas de responsabilidades dos agentes sobre a distorção de tensão de ordem 5 determinada para o PAC, evidenciam uma boa correlação entre os indicadores esperados (valores de referência) e os obtidos.

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 Responsabilidade
Supridor	$I_{f5-proj-5h} = 23,825 A$	61,22%
Consumidor	$I_{f5-proj-5h} = 15,09 A$	38,78%

Mais uma vez vale ressaltar que as grandezas retratadas na Tabela 1 exigiram o prévio conhecimento das impedâncias harmônicas das partes, enquanto que os novos valores aqui encontrados (Tabela 3) não necessitaram de tais parâmetros.

5.0 - CONCLUSÃO

O presente artigo contemplou uma questão de grande relevância na atualidade, a qual está atrelada com o compartilhamento sobre as responsabilidades entre o agente supridor e o consumidor no que tange as distorções harmônicas. O tema tratado encontra grande ressonância diante das perspectivas atuais e futuras relacionadas com o cumprimento das determinações contidas nos procedimentos da rede básica e também da distribuição da energia elétrica. 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 estabelecidos, a utilização dos mesmos encontra grandes barreiras quando da caracterização e obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos. Como demonstrado em outros trabalhos (9), as imprecisões vinculadas às impedâncias equivalentes conduzem a erros bastante significativos para os resultados dos compartilhamentos, fato este que determina a ineficácia do processo, nos termos atuais, para os propósitos almejados. À luz destas constatações, este trabalho foi centrado na busca de uma alternativa para contornar os problemas aqui apontados, fato este que orientou para uma sistemática que conduzisse a um mecanismo de cálculo para o qual as impedâncias do supridor e do consumidor passassem a ter um papel secundário no processo. Neste sentido surgiu a ideia da utilização, junto ao ponto de acoplamento entre a fonte a carga, de uma impedância dominante sobre as demais, fato este que originou a inserção de um filtro sintonizado, o qual, uma vez anexado ao arranjo sob análise, proporcionou meios para se atingir as proporções das responsabilidades entre as partes. Para ilustrar a aplicação da proposta, através de um arranjo elétrico hipotético, procedeu-se a aplicação do processo, o qual revelou uma boa correlação entre os resultados esperados e obtidos, ratificando, assim, que o método da superposição modificado apresenta um desempenho apropriado aos fins almejados. Naturalmente, há de se considerar que os indicativos até então obtidos foram fundamentados em cálculos teóricos e não em trabalhos de campo, fato este que orienta, inevitavelmente, a necessidade de estudos complementares até que a proposta possa ser considerada efetivamente um mecanismo adequado aos propósitos aqui postos.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2010.
- (2) IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-1992.
- (3) Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, European Standard EN 50160:1999.
- (4) Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication, IEC 61000-3-6, 1996.
- (5) Xu, W. and Liu, Y., "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, pp 804-811, April 2000.
- (6) Xu, W. and Liu, Y., "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications", IEEE Panel on Harmonic Measurements and Allocation, pp 361-366, 1999.
- (7) S. F. de Paula Silva, J. C. de Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study", Electric Power Systems Research, v. 78, Issue 11, p. 1959-1964, 2008.
- (8) Oliveira, J. C., Silva, S. F. P., Santos, I. N. and Costa, F. H., "A Case Study of Sharing the Harmonic Voltage Distortion Responsibility Between the Utility and the Consumer", International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Valencia (Spain), April 2009.
- (9) COSTA, Fernanda H.. Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Modelagem de Cargas nos Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2009.

7.0 - 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.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Ivan Nunes Santos nascido em 13/07/1979 em Prata-MG é engenheiro eletricista (2005) e mestre (2007) em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e, no momento, está cursando doutorado em Engenharia Elétrica. Atualmente é professor da Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Sua área de interesse é: sistemas potência e qualidade da energia elétrica.



José Carlos de Oliveira nascido em 24/08/1947 em Itajubá-MG é engenheiro eletricista (1970) e mestre (1974) em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Itajubá, e doutor (1978) em Engenharia Elétrica pela University of Manchester Institute of Science Technology, Manchester, GB. Atualmente é professor da Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Sua área de interesse é: sistemas potência e qualidade da energia elétrica.



José Rubens Macedo Junior nascido em 27/05/1972 em Uberlândia-MG é engenheiro eletricista (1997) e mestre (2002) em Engenharia Elétrica, ambos pela UFU, e doutor (2009) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Atualmente é professor da Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Sua área de interesse é: sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.