



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/19
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA- GAT

ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS PRINCIPAIS METODOLOGIAS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

**Andréia Crico dos Santos (*)
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA**

**José Carlos de Oliveira
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA**

**Ivan Nunes Santos
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA**

RESUMO

A definição de mecanismos confiáveis para a realização do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas assume importância, sobretudo, diante da necessidade de ratear, entre as partes envolvidas, os custos advindos da implementação de eventuais medidas mitigadoras. Nesse contexto, este artigo sintetiza os principais procedimentos encontrados na literatura para os fins ora postos e, em seguida, realiza estudos computacionais de desempenho dos mesmos, empregando o arranjo elétrico de catorze barras do padrão IEEE. Objetiva-se, assim, caracterizar as potencialidades e limitações das metodologias analisadas, bem como identificar caminhos encorajadores de investigação, na busca da efetiva solução da problemática.

PALAVRAS-CHAVE

Compartilhamento de Responsabilidades, Desempenho de Metodologias, Distorções Harmônicas, Qualidade da Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

Dentre a série de fenômenos acometedores da Qualidade da Energia Elétrica, merece destaque a problemática das distorções harmônicas. Esse assunto, apesar de já amplamente discutido na comunidade científica, ainda fomenta questões desafiadoras no atual contexto de operação dos sistemas elétricos. De fato, diante da massiva intensificação da utilização de cargas com características não lineares e, tendo em mente os variados efeitos nocivos que a presença de harmônicos pode provocar (1), paulatinamente, normas e recomendações têm procurado elencar orientações que visam à manutenção da qualidade da energia em níveis satisfatórios. Inseridos nesse contexto, podem ser citados os seguintes documentos normativos, em nível internacional: IEEE Standard 519-2014 (2) e IEC 61000-3-6 (3). Em termos de Brasil, é relevante salientar que a próxima revisão do módulo 8 do documento Procedimentos de Distribuição (PRODIST) (4) tende a atualizar o cenário em termos dessa problemática no país, fato que certamente despontará novas necessidades em diversos segmentos ligados à área. Ainda em âmbito nacional, merece ser citado o submódulo 2.8 do documento Procedimentos de Rede (5), elaborado pelo ONS, o qual preza pela manutenção dos padrões de qualidade da energia elétrica na rede básica.

Nesse particular, uma importante lacuna relacionada ao tema em pauta deve-se ao fato de os documentos existentes até o momento não contemplarem preocupações com a origem das distorções, ou seja, não existem orientações referentes a mecanismos capazes de determinar, junto a um determinado ponto ou barramento de medição, os percentuais de responsabilidades a serem atribuídos ao sistema supridor e ao consumidor.

De fato, a aplicação de métodos que conduzam ao efetivo compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas faz-se necessária, sobretudo, para evitar arbitrariedades e discordâncias quando constatada a violação dos limites preconizados para uma dada avaliação junto ao ponto de acoplamento comum (PAC). Em

(*) Avenida João Naves de Ávila, n° 2121 – sala 1N 05 – Bloco 1N – CEP 38.400-902 Uberlândia, MG – Brasil.
Tel: (+55 34) 3239-4760 – Email: andreia.crico@gmail.com

outras palavras, diante da necessidade da implementação de medidas mitigadoras, a exemplo da instalação de filtros, é imperativo o emprego de um procedimento sistematizado e confiável que culmine em um consenso sobre a responsabilidade financeira associada ao processo de mitigação a ser implementado em campo.

A análise da literatura mostra que ainda não há um consenso sobre o assunto do compartilhamento, não obstante aos esforços já realizados em exaustivas investigações que buscaram soluções por meio de diferentes linhas de pesquisa. Adentrando nessa conjuntura, os principais procedimentos conhecidos até o momento são: Método do Fluxo de Potência Harmônica (6), Método da Corrente Conforme e Não-Conforme (7), Método da Superposição (8,9), Método da Superposição Modificado (10) e Método da Análise dos Espectros de Frequências (11).

Entretanto, há sinais que os quatro primeiros métodos esbarram em obstáculos diversos, sejam eles associados a fragilidades inerentes aos desenvolvimentos propostos, ou dificuldades relacionadas à viabilidade de aplicação prática dos procedimentos. Já a metodologia aqui denominada de Análise dos Espectros de Frequências consiste em uma proposta relativamente recente e que, portanto, inspira especial atenção. Essa metodologia se compromete em definir as parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas de maneira bastante prática e se apresenta, à primeira vista, com características atrativas quanto à simplicidade das técnicas empregadas para trabalhos de campo.

Nesse sentido, o presente trabalho firma como objetivo a realização de uma avaliação crítica do desempenho dessas cinco propostas metodológicas, levando em consideração um complexo elétrico em consonância com um sistema real. Para isso, os estudos realizados foram direcionados para os seguintes pontos focais:

- Apresentação da fundamentação teórica sobre as metodologias analisadas;
- Aplicação dos métodos no âmbito computacional utilizando o arranjo elétrico de catorze barras do padrão IEEE, considerando três condições de operação distintas;
- Análise dos resultados e estabelecimento de termos conclusivos sobre a adequação dos procedimentos ora avaliados.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE AS METODOLOGIAS ANALISADAS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES

Nesta seção são apresentados os fundamentos sobre as cinco metodologias em evidência neste trabalho, as quais se propõem a realizar a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas constatadas em determinado ponto de um sistema elétrico.

2.1 Método do Fluxo de Potência Harmônica

O Método do Fluxo de Potência Harmônica (6) é baseado na relação existente entre a direção do fluxo de potência harmônica ativa na rede e a direção do fluxo de potência ativa de frequência fundamental. A metodologia em questão não permite a separação das parcelas de responsabilidade, porém indica o sentido predominante da fonte de harmônicos.

A potência harmônica ativa para uma determinada ordem h pode ser obtida conforme é mostrado em (1).

$$P_h = V_h \cdot I_h \cdot \cos \phi_h \quad (1)$$

Onde:

P_h = potência harmônica ativa de ordem h ;

V_h = módulo da tensão harmônica de ordem h ;

I_h = módulo da corrente harmônica de ordem h ;

ϕ_h = diferença angular ou de fases de ordem h .

Na ausência de geração interna do consumidor, adota-se como positivo o sentido do fluxo da potência ativa de frequência fundamental. Assim, a partir do ângulo ϕ_h é possível obter o sinal da potência harmônica e, de acordo com princípios clássicos, a metodologia preconiza que:

- $-90^\circ < \phi_h < 90^\circ$: neste caso a potência harmônica ativa tem sinal positivo e o supridor atua como gerador da ordem em questão;
- $90^\circ < \phi_h < 270^\circ$: neste caso, por outro lado, a potência harmônica ativa apresenta sinal negativo e o consumidor atua como gerador da ordem considerada.

2.2 Método da Corrente Conforme e Não Conforme

O Método da Corrente Conforme e Não Conforme (7) sugere a classificação das cargas consumidoras em duas categorias, a saber: aquelas que não produzem distorções adicionais às já presentes na fonte de tensão de suprimento (Grupo I) e aquelas que produzem distorções adicionais às originalmente presentes na tensão de suprimento (Grupo II). Dessa maneira, para cada frequência ω , a corrente total no ponto de interesse (I) pode ser

representada pela adição entre a parcela de suprimento das cargas do Grupo I, ou parcela conforme (\dot{I}_c), e a parcela de alimentação das cargas do Grupo II, ou parcela não conforme (\dot{I}_{nc}), como indica (2).

$$\dot{I}(\omega) = \dot{I}_c(\omega) + \dot{I}_{nc}(\omega) \quad (2)$$

Atentando-se ao fato de a corrente não conforme ser nula para a frequência fundamental (ω_1) e admitindo como pressuposto que as cargas do Grupo I possuem a mesma impedância para todas as frequências avaliadas, o desenvolvimento da metodologia conduz à determinação das parcelas de corrente conforme e não conforme, como é mostrado em (3) e (4).

$$\dot{I}_c(\omega) = \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (3)$$

$$\dot{I}_{nc}(\omega) = \dot{I}(\omega) - \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (4)$$

Finalmente, para fins da atribuição das responsabilidades no que se refere às distorções harmônicas, o processo considera que as parcelas de contribuição estão diretamente associadas com as proporções existentes entre as correntes conforme e não conforme para cada frequência.

A hipótese simplificadora associada a este procedimento, que considera o mesmo valor de impedância das cargas do Grupo I qualquer que seja a frequência, gerou diversos questionamentos na comunidade científica, visto que essa aproximação refuta os princípios básicos associados à resolução de circuitos elétricos.

2.3 Método da Superposição

Para a aplicação do Método da Superposição (8,9) faz-se necessário utilizar um circuito representativo do sistema investigado para cada ordem harmônica em análise, ver Figura 1.

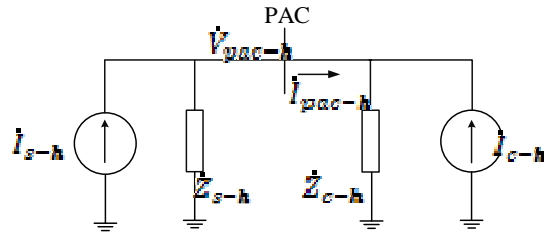


FIGURA 1 – Circuito equivalente de Norton de um sistema para uma determinada ordem harmônica h .

Tem-se que, na Figura 1:

\dot{I}_{pac-h} = corrente harmônica no PAC;

\dot{V}_{pac-h} = tensão harmônica na PAC;

\dot{I}_{s-h} = corrente harmônica gerada pela fonte referente ao circuito do supridor;

\dot{I}_{c-h} = corrente harmônica gerada pela fonte referente ao circuito do consumidor;

\dot{Z}_{s-h} = impedância harmônica referente ao circuito do supridor;

\dot{Z}_{c-h} = impedância harmônica referente ao circuito do consumidor.

A partir da análise do circuito equivalente de Norton e lançando mão dos princípios clássicos da superposição de circuitos, é possível determinar as contribuições sobre a tensão harmônica total no PAC (\dot{V}_{pac-h}) tanto do sistema supridor ($\dot{V}_{s-pac-h}$), quanto do sistema consumidor ($\dot{V}_{c-pac-h}$), como mostram (5) e (6).

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

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

Por conseguinte, como indica (5), a tensão total no PAC pode ser obtida por meio da adição fasorial de tais componentes.

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

Por fim, o Método da Superposição de Tensões 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 tensão ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre o fasor de tensão total no PAC (\dot{V}_{pac-h}).

Vale mencionar que essa metodologia sustenta-se em um princípio consistente, contudo, sua aplicação em campo é substancialmente dificultada pelo fato de os valores das impedâncias harmônicas do sistema supridor e, principalmente, do consumidor não serem dados facilmente encontrados ou calculados.

2.4 Método da Superposição Modificado

O Método da Superposição Modificado (10) surge como uma proposta que intuita, de maneira geral, contornar as dificuldades práticas de aplicação do princípio da superposição clássico. Nesse sentido, ao examinar (5) e (6), nota-se que existe um mesmo fator multiplicativo em ambas as equações e, assim sendo, as parcelas de contribuição das partes depende exclusivamente dos valores de \hat{I}_{s-h} e \hat{I}_{c-h} . Logo, para realizar o compartilhamento de responsabilidades basta conhecer tais correntes, ou a proporcionalidade entre ambas. Seguindo o raciocínio, a metodologia sugere que seja instalada uma impedância dominante no ponto de acoplamento comum do sistema e, para esse fim, pode ser utilizado um filtro que apresente baixa impedância na frequência de interesse à atribuição de responsabilidades. Isso culmina em um arranjo representativo do princípio da Superposição Modificado, ver Figura 2.

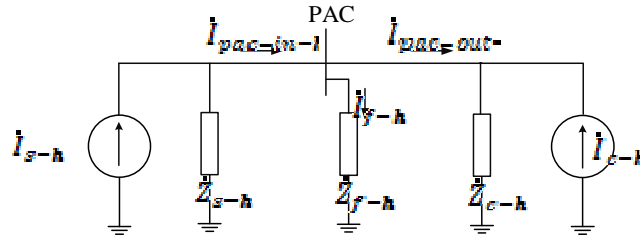


FIGURA 2 – Arranjo elétrico representativo do método da Superposição Modificado para a ordem harmônica h .

Na Figura 2, observa-se:

\hat{Z}_{f-h} – impedância harmônica de ordem h do filtro;

\hat{I}_{f-h} – corrente harmônica de ordem h no filtro;

$\hat{I}_{pac-in-h}$ – corrente harmônica de ordem h à montante do PAC;

$\hat{I}_{pac-out-h}$ – corrente harmônica de ordem h à jusante do PAC.

Como mencionado, \hat{Z}_{f-h} deve possuir caráter predominante sobre as demais, ou seja, seu valor deve se apresentar significativamente inferior aos valores das impedâncias harmônicas do sistema supridor e do consumidor. Assim, ao aplicar o princípio da superposição com o intuito de definir as contribuições das partes (\hat{I}_{fs-h} e \hat{I}_{fc-h}) sobre a corrente total no filtro (\hat{I}_{f-h}), constata-se que esta última pode ser representada como a soma fasorial retratada em (8).

$$\hat{I}_{f-h} = \hat{I}_{fs-h} + \hat{I}_{fc-h} = \hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h} = \hat{I}_{pac-in-h} - \hat{I}_{pac-out-h} \quad (8)$$

Objetivando o emprego da metodologia para definição dos percentuais de responsabilidades cabidos às partes envolvidas, o passo final refere-se à realização das projeções dos fasores \hat{I}_{fs-h} e \hat{I}_{fc-h} sobre o fasor \hat{I}_{f-h} para definição das contribuições individuais, respectivamente, do supridor e do consumidor para as distorções totais de tensão no PAC.

Essa metodologia fundamenta-se em sólidos princípios e dispensa o prévio conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas, entretanto, a necessidade de dispor de uma impedância dominante para conexão no PAC é um fato que pode dificultar seu emprego em casos reais.

2.5 Método da Análise do Espectro de Frequências

O Método da Análise dos Espectros de Frequências (11) considera como ponto inicial que uma carga com teor puramente resistivo pode ser considerada como uma carga ideal não poluidora, uma vez que, nesse caso, as formas de onda da tensão e da corrente são idênticas.

A metodologia estabelece, em um primeiro momento, que as formas de onda de tensão e corrente sejam normalizadas e decompostas em série de Fourier, obtendo-se, assim, as grandezas \hat{I}_{n-h} e \hat{V}_{n-h} , que são, respectivamente, a corrente e a tensão normalizadas no PAC para dada ordem harmônica h . A tensão \hat{V}_{n-h} , uma vez normalizada, passa a ser denominada por \hat{I}_{un-h} . Nestas circunstâncias, a partir desse ponto, torna-se possível obter a grandeza denominada \hat{I}_{cn-h} , a qual representa a diferença entre os fasores \hat{I}_{n-h} e \hat{I}_{un-h} , conforme é indicado em (6). O método afirma que tal diferença é nula apenas para o caso em que a carga é puramente resistiva e, por consequência, \hat{I}_{cn-h} representa a corrente no PAC procedente da contribuição do sistema consumidor.

$$\dot{I}_{cn-h} = \dot{I}_{n-h} - \dot{I}_{un-h} \quad (9)$$

A partir da obtenção dos fasores \dot{I}_{un-h} , \dot{I}_{n-h} e \dot{I}_{cn-h} o método articula que as contribuições do supridor ($\dot{I}_{s-contr-h}$) e do consumidor ($\dot{I}_{c-contr-h}$) podem ser determinadas a partir, respectivamente, da projeção dos fasor. \dot{I}_{un-h} sobre \dot{I}_{n-h} e pela projeção de \dot{I}_{cn-h} sobre \dot{I}_{n-h} . Para melhor elucidar a filosofia do método são mostrados os fasores envolvidos no procedimento, ver Figura 3, conforme indicado em (11).

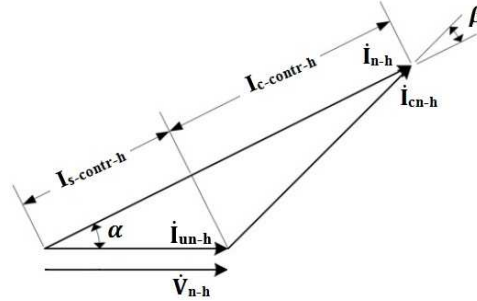


FIGURA 3 – Representação dos fasores normalizados para a ordem h .

3.0 - SISTEMA TESTE E CONDIÇÕES CONSIDERADAS PARA OS ESTUDOS DE CASO

Os estudos propostos foram conduzidos por meio do software ATP (*Alternative Transients Program*), o qual viabilizou a realização de simulações envolvendo o sistema elétrico de catorze barras do padrão IEEE, ver Figura 4. Optou-se por utilizar esse arranjo devido à sua grande identidade com a estrutura de sistema reais, além do fato de o mesmo já ter sido amplamente difundido e validado. Em face dessa situação, neste trabalho não são exibidas as informações relacionadas à parametrização dos componentes constituintes do complexo, porém ressalta-se que tais dados podem ser prontamente encontrados na literatura, a exemplo da referência (10).

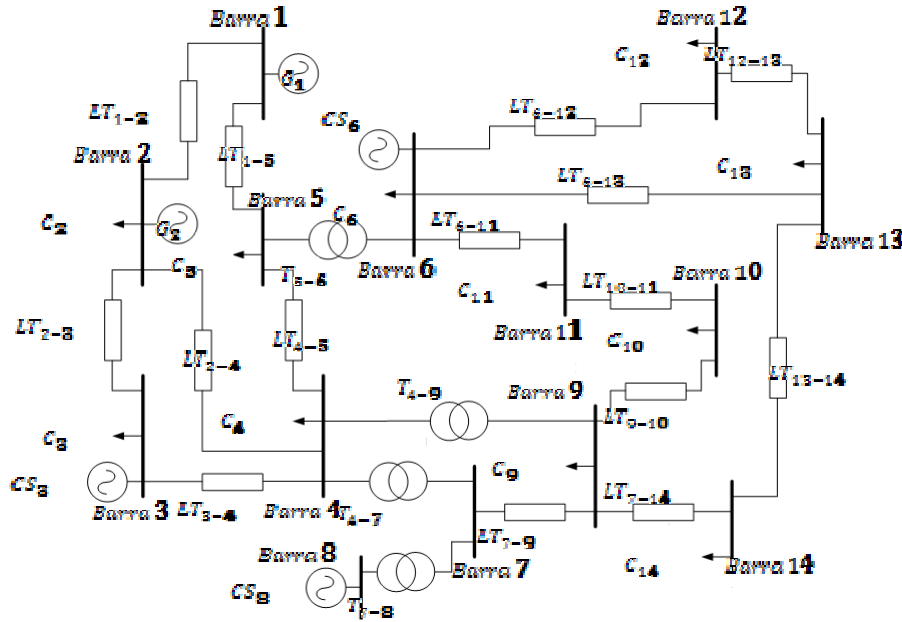


FIGURA 4 – Sistema padrão de 14 barras IEEE.

As investigações são conduzidas tomando por base a análise da problemática do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema elétrico equivalente visto a partir da barra 14 e a carga consumidora conectada nesse local. Portanto, o barramento 14 se configura como o ponto de interesse à aplicação das metodologias. Nesse sentido, três condições operativas distintas são exploradas, conforme descrito a seguir:

- Caso I: sistema elétrico constituído por um suprimento ideal em 60 Hz e cargas lineares, exceto pelo consumidor conectado à barra 14. Esse último se apresenta com uma composição de elementos lineares e não-lineares. A não linearidade de tal carga é modelada na forma de fontes de corrente, definidas, para os estudos, através de correntes harmônicas de ordem 5, 7, 11 e 13. Essas se apresentam consonantes com muitas cargas não lineares de grande porte, como é o caso dos retificadores de 6 pulsos. Diante dessa conjuntura, nesse caso toda a responsabilidade pelas distorções mensuradas PAC é devida ao

consumidor da barra 14;

- Caso II: sistema elétrico contendo distorções pré-existentes na rede de suprimento da barra 14. Para representar essa situação, são usadas fontes de correntes harmônicas de ordens: 5, 7, 11 e 13, as quais são introduzidas às barras de números 3, 4, 6, 9 e 13. Logo, nessa situação cabe ao sistema supridor do barramento 14 a totalidade da responsabilidade pelas distorções constatadas;
- Caso III: Esta situação compreende uma fusão das condições operativas supra postas, ou seja, os distúrbios dos casos I e II são impostos simultaneamente e, assim, as responsabilidades pelas distorções devem ser compartilhadas entre as partes. Esse caso é o mais próximo da realidade comumente constatada em sistemas reais.

Uma vez definidas as características de operação dos casos considerados, são expostos os valores para as tensões e correntes harmônicas e em 60 Hz para o ponto selecionado para os estudos, ver Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões e correntes obtidas no PAC (barra 14) para as três condições analisadas

Freq. [Hz]	Caso I		Caso II		Caso III	
	Tensão fase-neutro [V]	Corrente [A]	Tensão fase-neutro [V]	Corrente [A]	Tensão fase-neutro [V]	Corrente [A]
60	8146,7 \angle -15,45°	672,38 \angle -34,01°	8146,6 \angle -15,45°	672,35 \angle -34,0°	8147 \angle -15,45°	672,4 \angle -34,01°
300	124,0 \angle -169,56°	51,58 \angle -51,44°	337,35 \angle 138,84°	26,45 \angle 135°	425,2 \angle 152,01°	25,48 \angle -58,07°
420	143,83 \angle 163,8°	49,94 \angle -82,63°	229,18 \angle 134,55°	17,95 \angle 131,8°	361,29 \angle 145,73°	36,57 \angle -98,71°
660	198,44 \angle 81,95°	46,76 \angle -173,54°	155,33 \angle 90,60°	12,16 \angle 88,85°	352,79 \angle 85,71°	46,71 \angle 171,51°
780	137,66 \angle 104,64°	26,89 \angle -151,58°	32,59 \angle 141,59°	2,55 \angle 140,1°	164,81 \angle 111,41°	27,92 \angle -156,44°

4.0 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS PARA OS CASOS ANALISADOS

Nesta seção são evidenciados os resultados fornecidos pelas metodologias em destaque no trabalho, quando elas são aplicadas ao ponto de acoplamento entre o sistema elétrico e o consumidor conectado à barra 14 do arranjo de catorze barras do padrão IEEE, conforme supradetalhado. Faz-se oportuno adiantar, neste ponto, que os valores fornecidos pelo método da Superposição são tomados como referência para a análise de consistência dos resultados fornecidos pelos demais procedimentos, conforme será esclarecido no item 4.6.

4.1 Aplicação do Método do Fluxo de Potência Harmônica

A aplicação do Método do Fluxo de Potência Harmônica nas três condições por ora analisadas conduz aos resultados apresentados na sequência, ver Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da aplicação do Método do Fluxo de Potência Harmônica

Caso	h	Potência Harmônica Ativa [W]	Ângulo da Potência (°)	Sentido Predominante
I	1	18,56	5192941,92	Sistema
	5	-118,12	-3014,33	Carga da Barra 14
	7	246,43	-2872,04	Carga da Barra 14
	11	255,49	-2324,76	Carga da Barra 14
	13	256,22	-881,75	Carga da Barra 14
II	1	18,55	5192737,74	Sistema
	5	3,84	8903,55	Sistema
	7	2,75	4109,27	Sistema
	11	1,75	1887,78	Sistema
	13	1,50	83,08	Sistema
III	1	18,56	5193134,48	Sistema
	5	210,08	-9376,69	Carga da Barra 14
	7	244,44	-5700,66	Carga da Barra 14
	11	-85,80	1208,13	Sistema
	13	267,85	-172,64	Carga da Barra 14

4.2 Aplicação do Método da Corrente Conforme e Não Conforme

Em seguida são exibidos os valores obtidos a partir da aplicação do Método da Corrente Conforme e Não Conforme, ver Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da aplicação do Método da Corrente Conforme e Não Conforme

Caso	h	Corrente Conforme [A]	Corrente Não Conforme [A]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
I	1	672,38 \angle -34,01°	0	100	0
	5	10,23 \angle -188,12°	59,44 \angle -44,65°	14,69	85,31
	7	11,87 \angle 145,25°	58,57 \angle -73,98°	16,85	83,15
	11	16,38 \angle 63,40°	57,36 \angle -159,70°	22,21	77,79
	13	11,36 \angle 86,09°	34,34 \angle -135,35°	24,86	75,14
II	1	672,35 \angle -34,00°	0	100	0
	5	27,84 \angle 120,29°	7,09 \angle -131,14°	79,71	20,29
	7	18,91 \angle 116,00°	5,16 \angle -135,44°	78,58	21,42
	11	12,82 \angle 72,05°	3,71 \angle -179,4°	77,57	22,43
	13	2,69 \angle 123,04°	0,79 \angle -128,35°	77,32	22,68
III	1	672,40 \angle -34,01°	0	100	0
	5	35,09 \angle 133,45°	60,28 \angle -51,39°	36,80	63,20
	7	29,82 \angle 127,17°	61,19 \angle -78,23°	32,76	67,24
	11	29,12 \angle 67,15°	60,86 \angle -160,88°	32,36	67,64
	13	13,60 \angle 92,85°	35,12 \angle -135,20°	27,92	72,08

4.3 Aplicação do Método da Superposição

O Método da Superposição fornece os resultados destacados abaixo, ver Tabela 4. Nesse caso, como toda a topologia do sistema é conhecida, os dados referentes às impedâncias harmônicas das partes envolvidas puderam ser obtidos sem maiores dificuldades, fato este determinante para se considerar que os resultados obtidos devem ser utilizados como referência ou base para os estudos comparativos.

Tabela 4 – Resultados da aplicação do Método da Superposição

Caso	h	$\dot{V}_{s-par-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-par-h}$ [V]	Projeção de $\dot{V}_{s-par-h}$ sobre \dot{V}_{par-h} [V]	Projeção de $\dot{V}_{c-par-h}$ sobre \dot{V}_{par-h} [V]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
I	5	0,43 \angle 163,42°	123,62 \angle -169,47°	0,3817	123,62	0,31	99,69
	7	0,29 \angle 160,41°	143,54 \angle 163,81°	0,2935	143,54	0,20	99,80
	11	0,17 \angle 159,85°	198,40 \angle 81,90°	0,0361	198,40	0,02	99,98
	13	0,14 \angle 156,24°	137,57 \angle 104,59°	0,0863	137,57	0,06	99,94
II	5	337,35 \angle 138,84°	0,001 \angle -171,31°	337,35	0,0012	99,99	0,01
	7	229,19 \angle 134,55°	0,008 \angle -89,61°	229,19	-0,0058	99,99	0,01
	11	155,33 \angle 90,60°	0,003 \angle -116,39°	155,33	-0,0028	99,98	0,02
	13	32,59 \angle 141,58°	0,005 \angle -	32,59	-0,0015	99,98	0,02

			111,19°				
III	5	337,38∠ 138,8 2°	123,62∠ - 169,47°	328,48	96,72	77,25	22,75
	7	229,21∠ 134,5 3°	143,53∠ 163,81 °	224,84	136,45	62,23	37,77
	11	155,39∠ 90,59°	198,40∠ 81,90°	154,83	197,96	43,89	56,11
	13	32,60∠ 141,47°	137,57∠ 104,59 °	28,22	136,59	17,12	82,88

4.4 Aplicação do Método da Superposição Modificado

O Método da Superposição Modificado apresenta a resposta revelada a seguir, ver Tabela 5. Para sua aplicação, foram conectados ao PAC filtros passivos sintonizados, vez a vez, em 300 Hz, 420 Hz, 660 Hz e 780 Hz.

Tabela 5 – Resultados da aplicação do Método da Superposição Modificado

Caso	h	$I_{pac-in-h}$ [A]	$I_{pac-out-h}$ [A]	I_{f-h} [A]	Projeção de $I_{pac-in-h}$ sobre I_{f-h} [A]	Projeção de $I_{pac-out-h}$ sobre I_{f-h} [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
I	5	6,93∠ -99,3°	55,99∠ -43,23°	52,43∠ 143,1°	-3,21	-55,65	5,46	94,54
	7	4,19∠ -135,2°	54,90∠ -72,25°	53,12∠ 111,8°	-1,64	-54,76	2,90	97,10
	11	1,79∠ 129,3°	52,66∠ -157,3°	52,18∠ 24,6°	-0,45	-52,63	0,86	99,14
	13	0,75∠ 155,4°	31,21∠ -132,3°	30,99∠ 48,9°	-0,21	-31,20	0,67	99,33
II	5	146,50∠ 91,24°	3,55∠ 88,00°	143,00∠ 91,32°	146,50	3,54	97,64	2,36
	7	86,26∠ 82,42°	1,49∠ 80,36°	84,77∠ 82,45°	86,26	1,49	98,30	1,70
	11	41,32∠ 33,23°	0,45∠ 31,35°	40,87∠ 33,25°	41,32	0,45	98,92	1,08
	13	7,371∠ 85,92°	0,07∠ 98,93°	7,30∠ 85,79°	7,37	0,07	99,07	0,93
III	5	139,70∠ 91,74°	53,75∠ -40,37°	180,20∠ 104,5°	136,25	-43,96	75,61	24,39
	7	82,98∠ 84,17°	53,59∠ -71,50°	133,60∠ 93,68°	81,84	-51,81	61,24	38,76
	11	41,18∠ 35,70°	52,20∠ - 157,40°	92,78∠ 28,40°	40,85	-51,93	44,03	55,97
	13	7,67∠ 91,08°	31,15∠ - 132,40°	37,09∠ 55,75°	6,25	-30,84	16,86	83,14

4.5 Aplicação do Método da Análise do Espectro de Frequências

Por fim, na sequência são evidenciadas as informações referentes à aplicação do procedimento da Análise do Espectro de Frequências, ver Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da aplicação do Método da Análise do Espectro de Frequências

Caso	h	I_{cn-h} [A]	$I_{s-contr-h}$ [A]	$I_{c-contr-h}$ [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
I	5	0,084∠ -42,28°	-0,007	0,0832	7,93	92,07
	7	0,082∠ -71,30°	-0,007	0,0807	8,04	91,96
	11	0,079∠ -156,10°	-0,006	0,0750	7,52	92,48
	13	0,047∠ -130,99°	-0,004	0,0437	8,43	91,57
II	5	0,003∠ 9,63°	0,0413	-0,0020	95,45	4,55
	7	0,002∠ -4,18°	0,0281	-0,0014	95,26	4,74
	11	0,001∠ -60,18°	0,0190	-0,0010	95,15	4,85
	13	0,0002∠ -12,95°	0,0040	-0,0002	95,10	4,90
III	5	0,0867∠ -40,57°	-0,04501	0,0827	35,24	64,76
	7	0,0833∠ -70,12°	-0,01907	0,0732	20,68	79,32

11	0,0787 $\angle -155,36^\circ$	0,003163	0,0659	4,58	95,42
13	0,0466 $\angle -130,85^\circ$	-0,00076	0,0421	1,77	98,23

4.6 Análise de Desempenho das Metodologias

Como anteriormente citado, uma vez que o método da Superposição é baseado em um sólido princípio, os resultados fornecidos por essa metodologia foram usados como base de comparação para análise de desempenho das demais. Dessa maneira, a análise dos testes realizados conduz aos seguintes apontamentos:

- Método do fluxo de potência harmônica: os resultados evidenciaram respostas adequadas para as condições operativas I e II. No entanto, quando a condição III é avaliada, com exceção da ordem harmônica 13, todas as demais tiveram a principal fonte de distorção identificada de maneira equivocada;
- Método da Corrente Conforme e Não Conforme: observa-se que nos casos I e II o método indicou caminhos até certo ponto coerentes, no entanto, na condição III houve grande discrepância entre o obtido e o esperado, principalmente nas ordens 5 e 7;
- Método da Superposição: conforme adiantado, a aplicação do procedimento da superposição conduziu a um compartilhamento consistente em todos os casos. Porém, em casos reais seu emprego é dificultado devido à ausência das informações relacionadas às impedâncias harmônicas das partes envolvidas;
- Método da Superposição Modificado: apresentou consistência em todas as condições, no entanto a necessidade de dispor de uma impedância dominante, como um filtro, para conexão no PAC é um fato que dificulta, na maioria das situações, a aplicação prática deste processo;
- Método da Análise do Espectro de Frequências: muito embora essa técnica tenha apresentado resultados de certa forma promissores para as condições operativas I e II, nota-se uma total incoerência nos valores obtidos no caso III para todas as frequências harmônicas envolvidas na análise.

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho procurou lidar com a temática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, com foco na análise de desempenho das principais metodologias encontradas na literatura para esse fim, utilizando o sistema elétrico de catorze barras do padrão IEEE. Após breve exposição a respeito da base de fundamentação teórica dos métodos e da topologia do complexo elétrico usado para os testes, foram exibidos os valores obtidos a partir da aplicação dos cinco procedimentos investigados em três condições operativas distintas.

De um modo geral, é cabível afirmar que os resultados fornecidos pelas metodologias do Fluxo de Potência Harmônica, da Corrente Conforme e Não Conforme e da Análise do Espectro de Frequências foram suficientemente claros no sentido de atestar a inviabilidade da aplicação desses procedimentos em sistemas elétricos reais. Em certos casos, até mesmo nas condições de operação I e II, que eram as mais simples, foram constatados erros relevantes que distanciaram os valores encontrados daqueles esperados. Por outro lado, os métodos da Superposição e Superposição Modificado proporcionaram respostas condizentes, as quais evidenciaram a consistência metodológica de tais técnicas.

Todavia, foi ressaltado que a coerência manifestada por esses dois últimos procedimentos não sinaliza, ainda, a resolução da problemática do compartilhamento de responsabilidades, pois dificuldades de ordem prática acabam por inibir a viabilidade de aplicação dos mesmos em campo. Não obstante a esse fato, é preciso reconhecer que ambos se apresentam como os mecanismos mais promissores até o momento constatados e, nesse sentido, inspiram investigações adicionais que possam conduzir a caminhos capazes de unir confiabilidade e praticidade para a realização de um efetivo compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Jos Arrillaga, Neville R. Watson, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1985.
- (2) IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Standard 519-2014.
- (3) IEC – International Electrotechnical Commission. Electromagnetic Compatibility, (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: "Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems", IEC 61000-3-6, 2008.
- (4) ANEEL, "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST". Módulo 8- Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2012.
- (5) ONS, "Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes", Nov. 2011.
- (6) T. Tanak, H. Akagi, "A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 4, p. 1737-1742, 1995.
- (7) K. Srinivasan e R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 1, January 1998.
- (8) W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 2, p. 804-811, 2000.

- (9) W. Xu, Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications", IEEE Panel on Harmonic Measurements and Allocation, p. 361-366, 1999.
- (10) I. N. Santos, "Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas". (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- (11) F. M. Fernandez, P. S. Chandramohan Nair, "Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling", IET Generation, Transmission & Distribution, v. 7, n. 4, p. 374-381, 2013.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Andréia Crico dos Santos nascida em 10/06/1991 em Ituverava-SP é engenheira eletrícista (2013) e mestre (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é doutoranda na mesma universidade. Sua principal área de interesse é qualidade da energia elétrica.



José Carlos de Oliveira nascido em 24/08/1947 em Itajubá-MG é engenheiro eletrícista (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 Universidade Federal de Uberlândia. Sua principal área de interesse é: sistemas elétricos de potência com ênfase em qualidade da energia elétrica.



Ivan Nunes Santos nascido em 13/07/1979 em Prata-MG é engenheiro eletrícista (2005), mestre (2007) e doutor (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Em 2014 finalizou seu estágio pós-doutoral na Eindhoven University of Technology (TU/e), Holanda. Atualmente é professor e pesquisador na Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Suas principais áreas de interesse são: qualidade da energia, redes elétricas inteligentes e geração distribuída.