

Uma Reflexão sobre o Emprego do Método da Superposição via Tensões ou Correntes para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

A. C. Santos / UFU
J. C. Oliveira / UFU
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)
Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE)
Uberlândia-MG, Brasil
andrea.crico@gmail.com, jcoliveira@ufu.br

I. N. Santos / UFU
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)
Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE)
Uberlândia-MG, Brasil
ivan@ieee.org

Resumo— Este trabalho, inserido no contexto da qualidade da energia elétrica, objetiva promover discussões acerca dos procedimentos para realização do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Nas últimas décadas, vários documentos normativos foram elaborados contemplando a regulamentação dos níveis de distorções de tensões e correntes harmônicas. Não obstante a esses avanços, há de se reconhecer que o estabelecimento de procedimentos para a determinação das origens destes fenômenos ainda se mostra embrionária. Neste contexto, o presente artigo adentra na questão do emprego do Método da Superposição de tensões e correntes harmônicas para realização do compartilhamento de responsabilidades. Os estudos investigativos realizados evidenciam que, diferentemente do que ocorre quando se trabalha com as componentes de correntes, a superposição de tensões é fortemente influenciada por características da topologia dos sistemas e sua análise isolada pode conduzir a perspectivas limitadas.

Palavras-chave--compartilhamento de responsabilidades, distorções harmônicas, método da superposição, normatização, qualidade da energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Diante da modernização e das sucessivas modificações nos moldes de funcionamento dos sistemas elétricos, novos desafios surgem no contexto da Qualidade da Energia. Tal afirmação é endossada pelo fato de a qualidade do produto energia elétrica depender não apenas de processos relacionados às fases de geração, transmissão e distribuição, mas também das características operacionais de seus consumidores.

Dentro dessa concepção, observa-se que o aumento da conexão de cargas com características não lineares e a progressiva integração da geração distribuída em complexos elétricos têm ocasionado, via de regra, a intensificação dos níveis de distorções harmônicas. Por consequência, a notoriedade da questão relacionada ao compartilhamento de

responsabilidades torna-se cada vez mais evidente, sobretudo quando se verifica a necessidade de implementação de medidas mitigatórias.

Conforme constatado na literatura [1], grandes lacunas ainda são encontradas quando se trata da consolidação de uma metodologia para a realização do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas que seja, ao mesmo tempo, confiável e prática para aplicações em campo. Dentre os procedimentos até o momento concebidos, recebe destaque o Método da Superposição [2,3] que, conforme o próprio nome sugere, baseia-se no princípio clássico de superposição de circuitos elétricos. Sem entrar no mérito da análise de desempenho das metodologias para o compartilhamento, nota-se ainda a existência de outros aspectos merecedores de investigação que permeiam o assunto. Um desses pontos, o qual se apresenta como a base de reflexão deste artigo, refere-se à questão da pertinência da realização do compartilhamento utilizando tensões ou correntes harmônicas.

De fato, a maioria dos documentos elaborados visando oferecer orientações e definir valores de referência para as harmônicas estabelecem limites tão somente para distorções de tensão. Este é o caso das normas internacionais EN 50160 [4] e IEC 61000-3-6 [5], e, em termos de Brasil, do módulo oito do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) [6] e do submódulo 2.8 do documento Procedimentos de Rede [7]. Por outro lado, o documento IEEE 519-2014 [8] se distingue das demais por apresentar limites tanto para as distorções harmônicas de corrente, quanto de tensão.

De maneira geral, a IEC 61000-3-6 recomenda que, para cada frequência harmônica, os níveis permissíveis de distorção de corrente sejam obtidos por meio da divisão do valor máximo tolerável de distorção de tensão pela impedância harmônica do consumidor em questão. Dessa maneira, assegura-se que não existirão problemas relacionados à

ultrapassagem dos limites de tensão e o encargo por isso recai sobre o consumidor [9]. Já a IEEE 519-2014 prima pela união de esforços entre consumidores e concessionárias para manutenção dos patamares aceitáveis de distorções harmônicas, uma vez que se ainda houver problemas de distorção de tensão quando todos os consumidores estiverem dentro de seus limites de distorção de corrente, fica a cargo da concessionária a tarefa de restaurar a qualidade da tensão [9]. Os dois documentos brasileiros citados estabelecem tão somente valores relacionados a distorções de tensão, sem uma imposição direta a consumidores e, desse modo, caso limites sejam ultrapassados, são necessárias negociações entre concessionárias e consumidores.

Inserido nesse cenário de discussão, o presente trabalho procura evidenciar aspectos instigantes e contribuir para a análise das implicações decorrentes da realização do compartilhamento de tensões e correntes harmônicas a partir do Método da Superposição. Assim, este artigo está direcionado para os seguintes pontos focais:

- Apresentação da fundamentação analítica do Método da Superposição para compartilhamento de responsabilidades;
- Realização de um estudo de caso contemplando o compartilhamento de tensões e de correntes em um mesmo sistema elétrico, considerando diferentes condições operacionais;
- Análise dos resultados e estabelecimento de termos conclusivos sobre a problemática ora evidenciada.

II. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO PARA COMPARTILHAMENTO DE TENSÕES E CORRENTES HARMÔNICAS

O Método da Superposição [2,3] se apoia em um consolidado princípio de resolução de circuitos elétricos e, a despeito de determinadas dificuldades relacionadas à sua aplicação prática, pode-se afirmar que o procedimento é consistente, conforme ratificam alguns trabalhos [1,10]. Tendo como foco principal de análise um ponto de acoplamento entre o equivalente do sistema supridor e uma determinada unidade consumidora, pode-se representar o arranjo, para cada ordem harmônica em análise, pelo seu circuito equivalente de Norton, como ilustra a Fig. 1.

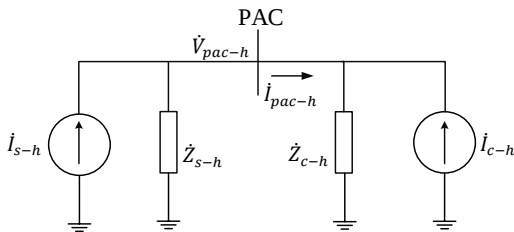


Figura 1. Circuito equivalente de Norton para uma determinada ordem harmônica h .

Na Fig. 1 tem-se que:

i_{s-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema supridor;

i_{c-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao consumidor;

Z_{s-h} – impedância harmônica de ordem h do sistema supridor;

Z_{c-h} – impedância harmônica de ordem h do consumidor;

V_{pac-h} – tensão harmônica de ordem h mensurada no ponto de acoplamento;

i_{pac-h} – corrente harmônica de ordem h mensurada no ponto de acoplamento.

A partir da análise desse circuito, as correntes representativas das fontes de harmônicos dos lados correspondentes ao sistema supridor e ao consumidor podem ser obtidas, respectivamente, como indicado em (1) e (2).

$$i_{s-h} = \frac{V_{pac-h}}{Z_{s-h}} + i_{pac-h} \quad (1)$$

$$i_{c-h} = \frac{V_{pac-h}}{Z_{c-h}} - i_{pac-h} \quad (2)$$

A metodologia sugere, então, que seja aplicado o princípio da superposição, como evidenciam os esquemas de Fig. 2 e Fig. 3, a fim de tornar possível a definição da contribuição individual de cada uma das fontes de harmônicos nas distorções totais constatadas no PAC.

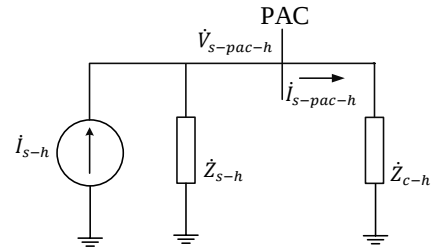


Figura 2. Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do sistema supridor.

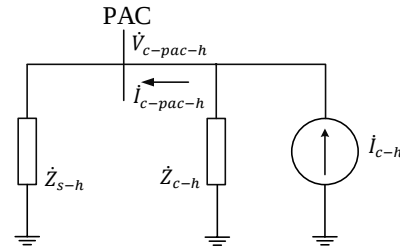


Figura 3. Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do consumidor.

Em Fig. 2 e Fig. 3 tem-se que:

$\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$ – contribuição, respectivamente, da concessionária e do consumidor para a corrente harmônica total de ordem h no PAC ($\dot{I}_{pac-h}$);

$\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ – contribuição, respectivamente, da concessionária e do consumidor para a tensão harmônica total de ordem h no PAC ($\dot{V}_{pac-h}$).

Com base nas definições supramencionadas, pode-se proceder à realização da superposição de correntes e tensões harmônicas.

A. Superposição de Correntes

A resolução analítica dos circuitos mostrados em Fig. 2 e Fig. 3 conduz, sem maiores dificuldades, ao estabelecimento dos fasores $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$, como indicam (3) e (4).

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

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

Adiante, a corrente total no PAC pode ser obtida conforme mostra (5).

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

Para a definição das parcelas de responsabilidades propriamente ditas, procede-se à realização da projeção 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 presente no PAC ($\dot{I}_{pac-h}$). Esse procedimento é evidenciado na Fig. 4.

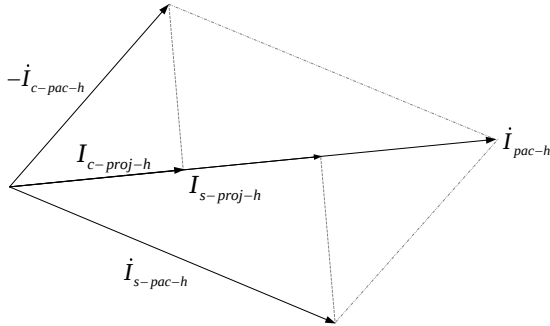


Figura 4. Projeção de fasores sobre a corrente total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na Fig. 4 observa-se:

$\dot{I}_{s-proj-h}$ – projeção de $\dot{I}_{s-pac-h}$ sobre $\dot{I}_{pac-h}$, a qual define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor.

$\dot{I}_{c-proj-h}$ – projeção de $\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre $\dot{I}_{pac-h}$, a qual define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

B. Superposição de Tensões

De maneira análoga ao procedimento envolvendo correntes, os fasores $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ podem ser obtidos como apresentado em (6) e (7).

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

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

Nesse sentido, a tensão harmônica no PAC é constituída pela soma fasorial das contribuições individuais das partes, como apresenta (8).

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

Por fim, para encontrar as parcelas de responsabilidades sobre as tensões harmônicas, como evidenciado na Fig. 5, deve-se realizar a superposição das contribuições individuais ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre a tensão total no PAC ($\dot{V}_{pac-h}$).

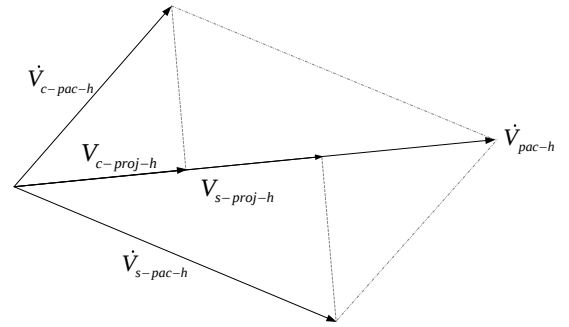


Figura 5. Projeção de fasores sobre a tensão total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na Fig. 5 obtém-se:

$\dot{V}_{s-proj-h}$ – projeção de $\dot{V}_{s-pac-h}$ sobre $\dot{V}_{pac-h}$, a qual define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor.

$\dot{V}_{c-proj-h}$ – projeção de $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre $\dot{V}_{pac-h}$, a qual define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

III. SISTEMA TESTE E CASOS AVALIADOS NOS TRABALHOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações computacionais desenvolvidas neste trabalho foram realizadas a partir do software ATP (*Alternative Transients Program*). Dessa maneira, a topologia do complexo elétrico teste, modelado no referido programa, é apresentada na Fig. 6. Como se nota, o sistema representa um ponto de acoplamento comum entre uma concessionária de energia e um consumidor industrial, o qual possui transformadores, cabos, cargas lineares resistivas e indutivas, motores, banco de capacitores para correção do fator de potência e fontes de corrente harmônica sinalizadoras da presença de cargas não lineares. As tabelas I a VI apresentam a parametrização dos equipamentos constituintes da indústria, a qual buscou representar características operacionais próximas à realidade comumente encontrada em campo.

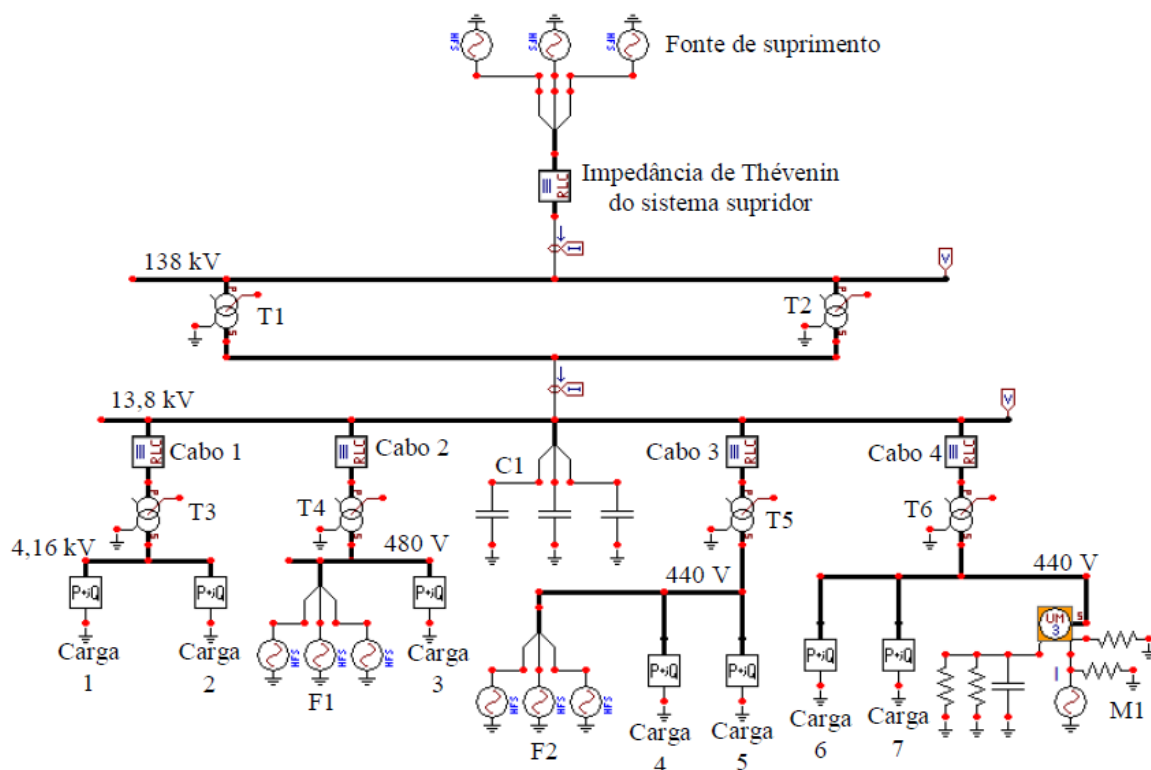


Figura 6. Modelagem do sistema investigado no software ATP

TABELA I. DADOS DOS TRANSFORMADORES.

	Potência Nominal [MVA]	Tensões [kV]	Resistência [%]	Reatância [%]	Conexão
T1	7,5	138/13,8	1	6	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$
T2	7,5	138/13,8	1	6	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$
T3	3	13,8/4,16	1,5	7	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$
T4	3	13,8/0,48	1,5	7	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$
T5	2	13,8/0,44	1,5	7	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$
T6	2	13,8/0,44	1,5	7	$\Delta - Y_{\text{aterrada}}$

TABELA II. DADOS DOS CABOS.

Cabo	Classe de Tensão / Corrente Nominal	Comp. [km]	Bitola [mm ²]	Resistência [Ω /km]	Reatância [Ω /km]
Cabo 1	13,8kV/129A	1,5	25	0,971	0,158
Cabo 2	13,8kV/129A	1,0	25	0,971	0,158
Cabo 3	13,8kV/129A	2,0	25	0,971	0,158
Cabo 4	13,8kV/129A	0,8	25	0,971	0,158

TABELA III. DADOS DAS CARGAS LINEARES.

Carga	Tensão [kV]	Potência Nominal [MVA]	Fator de Potência
Carga 1	4,16	604,7	0,85
Carga 2	4,16	1309,4	0,85
Carga 3	0,48	2111,5	0,99
Carga 4	0,44	861,1	0,98
Carga 5	0,44	611,2	0,85
Carga 6	0,44	836,3	0,90
Carga 7	0,44	253,5	0,85

TABELA IV. DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO.

Motor	Potência [cv]	Tensão Nominal [V]	Rendimento/ Escorregamento	Inércia [kg.m ²]	Fator de Potência
M1	150	440	89% / 0,015	7,728	0,85

TABELA V. DADOS DO BANCO DE CAPACITORES.

Banco	Tensão [kV]	Potência Nominal [MVar]
C1	13,8	1,5

TABELA VI. DADOS RELATIVOS ÀS FONTES DE CORRENTE.

Frequência [Hz]	F1 [A]	F2 [A]
300	1446,03 $\angle$ -12,35°	1035,49 $\angle$ -0,60°
420	963,36 $\angle$ -123,15°	857,72 $\angle$ -109,81°
660	410,69 $\angle$ 118,10°	382,69 $\angle$ 152,79°
780	404,25 $\angle$ -50,40°	362,32 $\angle$ -29,50°

No que tange à modelagem do equivalente do sistema supridor, as simulações foram feitas considerando a análise de três casos distintos, como elucida a tabela VII.

TABELA VII. DADOS DO SISTEMA SUPRIDOR NOS TRÊS CASOS ESTUDADOS.

Caso	Potência de Curto-circuito [MVA]	Tensão Nominal [kV]	Frequência [Hz]
Caso 1	2000	138	60
Caso 2	500	138	60
Caso 3	100	138	60

Salienta-se que, nas três situações avaliadas, foi considerada a existência de um mesmo padrão de distorção imposto pela concessionária, representado por uma distorção total de tensão (DTT) de 5,28%. A tabela VIII apresenta os valores das tensões de linha de cada frequência harmônica presente na fonte supridora.

TABELA VIII. DADOS RELATIVOS À FONTE SUPRIDORA DE TENSÃO.

Freq. [Hz]	300	420	660	780
Tensão[V]	5143,9 $\angle$ 142°	4409,1 $\angle$ 201°	2345,4 $\angle$ 58°	1287,2 $\angle$ -9°

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO DA SUPERPOSIÇÃO DE CORRENTES E TENSÕES NOS TRÊS CASOS ESTUDADOS

Seguindo as definições descritas na seção anterior, os trabalhos investigativos subsequentes contemplam a análise de uma mesma unidade consumidora industrial conectada em três sistemas elétricos que contam com idêntico padrão de pré-distorção, porém apresentam níveis de curto-circuito distintos. A metodologia da superposição de tensões e correntes é aplicada em cada uma das situações, com o intuito de respaldar a reflexão sobre a adequação de cada uma dessas técnicas para fins de compartilhamento de responsabilidades.

Para proceder à aplicação do procedimento ora evidenciado, conforme descrito na seção II, é necessário, primeiramente, conhecer os valores de impedâncias harmônicas das partes envolvidas no processo de compartilhamento. Esses parâmetros podem ser facilmente obtidos, uma vez que a topologia do sistema analisado é totalmente conhecida. A tabela IX apresenta os valores de impedâncias harmônicas da indústria e do sistema supridor nas três situações estudadas.

TABELA IX. IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DAS PARTES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE COMPARTILHAMENTO.

Frequência [Hz]	300	420	660	780
Impedância Supridor [Ω]	Caso 1	47,6∠90°	66,7∠90°	104,7∠90°
	Caso 2	190,4∠90°	266,6∠90°	419,0∠90°
	Caso 3	952,2∠90°	1333,1∠90°	2094,8∠90°
Imp. Indústria [Ω]	2110,9∠-32,8°	1522,7∠-41,8°	621,2∠-39,9°	328,0∠-15,8°

A tabela X apresenta, para os casos avaliados, os valores de tensões e correntes harmônicas determinadas computacionalmente no ponto de acoplamento comum (PAC) entre a concessionária e a indústria.

TABELA X. TENSÕES E CORRENTES MENSURADAS NO PAC.

Frequência [Hz]	300	420	660	780
Tensões de linha [V]	Caso 1	3439∠137,5°	3028,9∠-158°	990,7∠53,1°
	Caso 2	4774,1∠129°	4666,7∠-154°	870,5∠148°
	Caso 3	12990∠97,6°	14523∠171,8°	2808∠102,7°
Correntes [A]	Caso 1	9,84∠-157,6°	7,41∠-47,9°	3,39∠-32,9°
	Caso 2	10,20∠-161°	8,06∠-54,6°	3,93∠-67,8°
	Caso 3	11,53∠176,7°	9,22∠-103,5°	1,02∠-138,8°

De maneira complementar às informações até o momento apresentadas, e com o objetivo de fornecer uma visão mais clara acerca das modificações ocorridas no sistema em cada situação investigada, a tabela XI exhibe os níveis de distorção total de tensão (DTT) e de corrente (DTI) no PAC. Nota-se que as distorções de corrente permanecem praticamente constantes, enquanto diferenças são observadas no que se refere às tensões. Elucida-se, ainda, que a considerável variação dos níveis de curto-circuito do sistema e os expressivos níveis de distorções impostos ao complexo elétrico foram propositalmente escolhidos durante os trabalhos de simulação computacional, com o propósito de bem evidenciar as discrepâncias constatadas quando da adoção da análise de compartilhamento de tensões e de correntes.

TABELA XI. NÍVEIS DE DISTORÇÕES MENSURADOS NO PAC.

DTT [%]		DTI [%]	
Caso 1	6,11	Caso 1	54,58
Caso 2	8,92	Caso 2	51,58
Caso 3	25,27	Caso 3	52,98

Na sequência, as tabelas XII e XIII apresentam os resultados relativos à aplicação da Metodologia da Superposição de tensões e correntes, respectivamente.

TABELA XII. APLICAÇÃO DA SUPERPOSIÇÃO DE TENSÕES.

	Freq. [Hz]	$\hat{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\hat{V}_{c-pac-h}$ [V]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
Caso 1	300	3058,2∠140,1°	409,7∠117,1°	88,8	11,2
	420	2645,4∠-163°	474,8∠-124°	86,9	13,1
	660	1492,6∠45,9°	524,6∠-148°	75,1	24,9
	780	748,5∠-37,12°	805,2∠-109°	47,2	52,8
Caso 2	300	3162,4∠136,7°	1700,5∠-114°	65,6	34,4
	420	2875,5∠-170°	2063,9∠-131°	59,2	40,8
	660	1752,4∠11,7°	2454,4∠117,4°	37,2	62,8
	780	465,0∠-83,1°	1977,3∠-155°	10,8	89,2
Caso 3	300	3595,5∠114,2°	9598,6∠91,51°	26,5	73,5
	420	3277,6∠140,4°	11847∠-179°	19,3	80,7
	660	487,2∠-59,1°	3274,2∠105,3°	12,4	87,6
	780	98,0∠-109,8°	2105,5∠175,6°	1,4	98,6

TABELA XIII. APLICAÇÃO DA SUPERPOSIÇÃO DE CORRENTES.

	Freq. [Hz]	$\hat{I}_{s-pac-h}$ [A]	$\hat{I}_{c-pac-h}$ [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
Caso 1	300	1,45∠172,9°	8,60∠27,12°	12,8	87,2
	420	1,74∠-121,6°	7,12∠145,7°	6,6	93,4
	660	2,40∠85,9°	5,01∠122,2°	20,3	79,7
	780	2,28∠-21,4°	6,50∠160,9°	26,0	74,0
Caso 2	300	1,49∠169,6°	8,93∠27,73°	12,8	87,2
	420	1,89∠-128°	7,74∠139°	6,7	93,3
	660	2,82∠51,62°	5,86∠87,4°	20,7	79,3
	780	1,42∠-67,3°	3,99∠115,4°	26,2	73,8
Caso 3	300	1,70∠147°	10,08∠1,5°	12,8	87,2
	420	2,15∠-177,8°	8,89∠90°	6,3	93,7
	660	0,78∠-19,2°	1,56∠15,3°	21,6	78,4
	780	0,30∠-94°	0,85∠85,6°	25,9	74,1

A análise dos resultados obtidos deve se iniciar respaldada na constatação do fato de os compartilhamentos de correntes e tensões serem procedimentos de natureza distinta, porque, evidentemente, trata-se de grandezas diferentes, conforme amplamente discutido em [11]. Assim, deve-se ter claro que o emprego da superposição de correntes para fins de compartilhamento de tensões se mostra totalmente ineficaz, e vice-versa.

Isso posto, o principal interesse deste trabalho se configura em avançar nas discussões sobre qual procedimento se mostra mais adequado para fins de aplicação em campo. A observação das tabelas XII e XIII revela que os resultados encontrados para os percentuais de responsabilidades sobre distorções de correntes, cabidos à concessionária e à indústria, nos casos 1, 2 e 3, apresentam-se praticamente inalterados, ao mesmo tempo em que grandes diferenças são constatadas quando se analisa os percentuais relacionados ao compartilhamento de tensões. No caso da simulação envolvendo o sistema forte (caso 1), ao sistema supridor são predominantemente atribuídas as responsabilidades sobre as tensões harmônicas, enquanto que para o sistema fraco (caso 3) ocorre uma inversão dessa realidade, ou seja, nessa situação a predominância das responsabilidades recai sobre o consumidor.

Matematicamente, a diferença observada no comportamento da aplicação da metodologia da superposição de correntes e tensões pode ser explicada pela análise das formulações apresentadas na seção II. Como se nota em (1), a alteração unicamente da impedância equivalente do sistema supridor provoca modificações nos valores de I_{s-h} nos três casos, e I_{c-h} mantém-se constante. Durante o compartilhamento de correntes, nas equações (3) e (4) os termos que multiplicam I_{s-h} e I_{c-h} são distintos, de forma a propiciar uma correspondência na relação entre $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$, o que culmina em parcelas de responsabilidades aproximadamente constantes. Já quando se avalia a superposição de tensões, nota-se em (6) e (7) que um mesmo fator multiplica I_{s-h} e I_{c-h} . Isso provoca substanciais diferenças na proporção obtida entre $V_{s-proj-h}$ e $V_{c-proj-h}$, fato que resulta na obtenção de alterações nos percentuais de compartilhamento.

Fisicamente, a interpretação desses fatores leva a crer que, considerando tão somente o compartilhamento de tensões, uma unidade consumidora industrial, geradora de determinado conteúdo harmônico, pode se apresentar como a causadora majoritária das distorções no PAC, quando conectada a um sistema fraco, ao passo em que pode caracterizar-se como pouco influente no total de distorções, se conectada a um sistema forte. Esse resultado inspira atenção, visto que, o compartilhamento de tensões pode mascarar o potencial de danos advindos dos efeitos nocivos [12] das distorções ocasionadas por certo consumidor quando o mesmo encontra-se ligado a um supridor com elevado nível de curto-circuito.

Essas constatações levantam questionamentos sobre a consideração isolada da superposição de tensões para fins de compartilhamento de responsabilidades. Até mesmo o fato de se estabelecer valores limítrofes apenas para distorções de tensão pode ser discutível, uma vez que, como mostra a tabela XI, os valores de DTT são altamente influenciáveis pela topologia do sistema supridor, diferentemente dos níveis de DTI. Nesse sentido, ao considerar unicamente patamares de distorções de tensão, uma mesma unidade consumidora pode estar sujeita a penalizações ou não, dependendo de quão forte for a rede na qual estiver conectada.

Em outras palavras, os estudos conduzidos evidenciam que considerar unicamente a grandeza tensão harmônica pode ser uma prática insuficiente para caracterizar com clareza o conteúdo poluidor gerado por determinada carga.

V. CONCLUSÕES

Dentro do contexto da definição de meios adequados para a realização do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, este artigo pretendeu analisar as particularidades relacionadas à aplicação da Metodologia da Superposição de tensões e correntes.

Ao lançar mão de um sistema elétrico típico, representativo de um ponto de acoplamento entre uma concessionária e uma unidade consumidora industrial, foram feitas simulações computacionais considerando três condições distintas, nas quais o único parâmetro alterado foi o nível de curto-circuito do sistema supridor. De maneira geral, os

resultados da superposição de correntes mantiveram-se praticamente inalterados em todas as situações, enquanto, por outro lado, foram observadas consideráveis diferenças no compartilhamento de tensões harmônicas. De fato, a alteração da conexão da mesma indústria de um sistema forte para um sistema fraco inverteu a atribuição das responsabilidades majoritárias sobre as distorções de tensões harmônicas.

Diante dos aspectos evidenciados ao longo do trabalho, considera-se, por fim, que merecem destaque documentos que primam pela preocupação em estabelecer valores limítrofes tanto para níveis de distorções de corrente, quanto de tensão, como é o caso da IEEE 519-2014. No que tange ao procedimento de atribuição de responsabilidades, deve-se ter em mente que a superposição de correntes é capaz de fornecer uma ideia clara acerca do conteúdo harmônico de corrente representativo das distorções causadas pelas partes envolvidas no processo de compartilhamento. Ater-se apenas à análise da superposição de tensões pode conduzir a resultados altamente influenciados pelo nível de curto-circuito do sistema supridor, o que de fato pode camuflar o total de distorção gerado por uma carga potencialmente poluidora.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao CNPq pelo suporte financeiro (Proc. 460208/2014-4), e à Universidade Federal de Uberlândia pela estrutura disponibilizada para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "Análise de Desempenho das Principais Metodologias para o Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas", Anais do Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu/PR, 2015.
- [2] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling". IEEE Trans. Power Del., v. 15, n. 2, p. 804-811, 2000.
- [3] W. Xu, Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications". In: IEEE Panel on Harmonic Measurements And Allocation, p. 361-366, 1999.
- [4] EN – European Standard, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", EN 50160:2010.
- [5] 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 - Basic EMC publication", IEC 61000-3-6, 2008.
- [6] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST". Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2015.
- [7] 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.
- [8] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Standard 519-2014.
- [9] M. Barbosa, "Análise Comparativa entre as normas IEEE e IEC", Eletricidade Moderna, Ano 42, nº 478, pp. 68-75, Jan. 2014.
- [10] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "A Comparative Analysis between Methodologies for Responsibility Assignment on Harmonic Distortions", Renewable Energy and Power Quality Journal, n. 13, 2015.
- [11] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Critical Analysis of the Current and Voltage Superposition Approaches at Sharing Harmonic Distortion Responsibility", Revista IEEE América Latina, v. 9, p. 516-521, 2011.
- [12] Jos Arrillaga, Neville R. Watson, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1985.