

Compartilhamento de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas: Estado da Arte, Premissas e Desafios

I.N. Santos, A.C. Santos, J.C. Oliveira, A.C. Souza, A.F. Bonelli, F.M. Silva

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA – FEELT

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

ivan@ufu.br, andrea.crico@gmail.com, jcoliveira@ufu.br, arthur_costasouza@hotmail.com,

afbonelli@gmail.com, fabriciomontes.silva@gmail.com

Resumo — Este artigo trata da problemática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes em um ponto de conexão do sistema elétrico. Sabe-se, neste tocante, que muitos desenvolvimentos científicos têm sido feitos nestas duas últimas décadas, porém sem o estabelecimento de um consenso sobre o melhor, ou mais adequado, processo de separação de responsabilidades. Assim sendo, neste documento, pretende-se realizar uma atualização do estado da arte do tema, apresentando algumas premissas básicas desta problemática e elencando os desafios que ainda se fazem presentes neste íterim.

Palavras-chaves — Compartilhamento de Responsabilidades, Distorções Harmônicas, Metodologias de Compartilhamento.

I. INTRODUÇÃO

As distorções harmônicas representam um clássico distúrbio de qualidade da energia, o qual experimenta considerável intensificação nas últimas décadas, devido à modernização dos moldes de funcionamento dos sistemas elétricos. Nesse contexto, vale ressaltar uma importante questão, emergente para os agentes operadores de sistemas, relacionada à integração de geração eólica, bem como geração distribuída, aos complexos elétricos. Dentre os desafios advindos dessa perspectiva, ressalta-se a questão do compartilhamento de responsabilidades entre os agentes envolvidos no processo, ou seja, a atribuição das responsabilidades, tema este que se apresenta como cerne do presente trabalho.

Tendo por base esse cenário, este artigo tece considerações gerais e conceituais quanto a aspectos gerais relacionados ao tema, seguido de uma apresentação sistematizada dos principais procedimentos até o momento propostos para se obter, para um dado barramento de conexão, do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. As metodologias contempladas na literatura são apresentadas em consonância com seus fundamentos, assim como são ressaltados os distintos documentos que perfazem o acervo bibliográfico.

O presente informe técnico, trata-se, portanto, de um trabalho científico, bem embasado, de atualização do estado da

arte do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, com levantamento de premissas e apresentação dos desafios que ainda se fazem presentes neste contexto.

II. SÍNTESE DO LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO REALIZADO

O tema do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas suscita, desde a década de 1990, uma série de pesquisas e publicações em nível nacional e internacional. Esclarece-se que este trabalho abrange um compêndio geral sobre o desenvolvimento das investigações relacionadas ao tema, sendo que as principais referências bibliográficas encontradas na literatura são discutidas, individualmente, na Seção III do presente documento.

Em 1995 foi publicado o primeiro procedimento para a atribuição de responsabilidades harmônicas que desperta especial atenção, o chamado método do Fluxo de Potência Harmônica. Tal proposição não se compromete em definir parcelas de responsabilidades, mas tão somente visa à identificação da fonte de distorções dominante no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Apesar de essa metodologia ser empregada até mesmo em alguns equipamentos de medição, alguns trabalhos, preocupados em avaliar a confiabilidade do processo, demonstraram evidentes fragilidades relacionadas à sua aplicação.

Outro procedimento, proposto em 1996, conhecido como método da Corrente Conforme e Não Conforme, considera em seu desenvolvimento algumas hipóteses simplificadoras que refutam princípios básicos ligados à teoria de circuitos elétricos de corrente alternada. Este fato levantou muitos questionamentos na comunidade científica interessada no assunto e alguns trabalhos atestaram fortes inconsistências ao avaliar o desempenho dessa metodologia.

O método da Superposição, publicado em 2000, mostra-se como uma proposta de grande difusão na literatura e fundamenta-se, conforme sua própria denominação sugere, no princípio básico de superposição de circuitos elétricos. Os seus fundamentos encontram sustentação em princípios básicos aplicáveis a circuitos elétricos e, face este sólido fundamento, muitos trabalhos realizados confirmaram a eficácia do

procedimento. No entanto, vale ressaltar que a principal dificuldade de aplicação prática do mesmo refere-se à necessidade de se conhecer o valor das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor.

No contexto da busca por metodologias que venham a contemplar a caracterização dessas impedâncias harmônicas, encontram-se publicações desde a década de 1980. Estas reportam-se a técnicas capazes de determinar, com precisão adequada, a impedância harmônica do sistema supridor. Contudo, muitas dificuldades são observadas no que se refere aos mecanismos vinculados à determinação da impedância harmônica do consumidor. Sobre esse assunto, a literatura aponta a existência de processos invasivos e não invasivos, sendo que sérias fragilidades já foram constatadas no que se refere ao âmbito de desenvolvimentos que procuram modelar cargas utilizando componentes passivos associados a elementos representativos de eventuais não linearidades. Observa-se, ainda, a existência de várias propostas recentes baseadas em outros campos de pesquisa, como, por exemplo, a utilização de técnicas de otimização e estatística.

Diante dessa conjuntura, uma proposição, apresentada em 2011, denominada como método da Superposição Modificado procurou contornar as dificuldades associadas à aplicação do tradicional método da Superposição, por meio da utilização de uma impedância harmônica dominante no PAC. Esse procedimento carece da utilização de uma impedância dominante, a exemplo de filtros harmônicos, os quais são conectados junto ao ponto de acoplamento ou de acesso. Apesar do desempenho promissor até o momento apresentado por essa metodologia, estudos e refinamentos se fazem necessários para a sua efetiva aplicação na prática.

Nos dias de hoje, existem ainda outras propostas, envolvendo diferentes campos de investigações, que buscam encontrar soluções viáveis para a problemática do compartilhamento. Como exemplo, pode ser citada uma proposta publicada em 2013 e aqui denominada Análise do Espectro de Frequências. Esse método se comprometeu em definir as parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas de forma atrativa, à primeira vista, devido à sua grande praticidade. Contudo, avaliações já apontaram certas fragilidades do procedimento, que não apresentou a confiabilidade necessária para o emprego em sistemas reais.

Inseridas nesse contexto, podem ser citadas ainda diversas técnicas que utilizam redes neurais, estimação de estados, estatística, entre outras. Em geral, muitos destes trabalhos se preocupam em identificar os principais pontos causadores de distorções em um sistema, sem tratar da definição efetiva de parcelas de responsabilidades da concessionária e do consumidor em determinado ponto de acesso entre estes, comumente designado por PAC.

Diante do resumo panorama apresentado, nota-se a abrangência e complexidade do tema cerne desta pesquisa e, em consonância com o exposto, este artigo apresenta na próxima seção o resultado do levantamento bibliográfico realizado visando o reconhecimento do estado da arte do assunto em pauta. Tal levantamento abrange, num primeiro momento, cerca de 120 referências, assim distribuídas:

- 05 livros;
- 08 normas e recomendações;
- 11 publicações compreendendo dissertações de mestrado e teses de doutorado;

- 97 artigos técnicos, sendo 26 de alcance nacional e 71 de alcance internacional.

Destaca-se que as publicações foram agrupadas, na próxima seção, em função de sua natureza, assunto e procedência, em ordem cronológica. Evidencia-se, ainda, que neste tocante do compartilhamento de harmônicas, foi considerada uma divisão entre seis vertentes ou princípios que nortearam os procedimentos para o atendimento às premissas postas, como destacado na Fig. 1. Esta enfatiza, quantitativamente, os trabalhos analisados, de acordo com os fundamentos comuns.



Fig. 1. Quantitativo do resultado do levantamento bibliográfico aos subitens do tópico: trabalhos relacionados ao compartilhamento de harmônicas.

Na sequência são descritas, na forma de sínteses, as publicações selecionadas e consideradas relevantes para fins deste estudo, considerando, para tanto, a organização apresentada. Não obstante a exaustiva busca por publicações próprias ao assunto, fica aqui registrado o reconhecimento que tal trabalho compreendeu um levantamento através de todos os meios de acesso em prática e disponibilizados no Brasil, deste modo, eventuais pesquisas não contempladas ou referenciadas através destes recursos podem ter sido desconsiderados.

III. ESTADO DA ARTE, PREMISSAS E DESAFIOS

Tendo em vista o grande número de referências levantadas (mais de 120) e considerando o limite de páginas das publicações desta conferência, serão aqui apresentadas apenas as principais referências, com as metodologias centrais, as quais encontram divididas conforme distribuição da Fig. 1.

A. Método do Fluxo de Potência Harmônica

Num primeiro momento em termos internacionais, pode-se citar a referência [1], a qual apresenta uma proposta para identificar, em sistemas trifásicos, as cargas geradoras de distorções harmônicas. A metodologia é baseada na análise do fluxo de potência harmônica ativa. Testes experimentais foram executados, sendo que alguns procedimentos relacionados à instrumentação também foram evidenciados no artigo. Já em [2], tem-se a apresentação de um método de detecção do fluxo de potência harmônica com base na potência ativa instantânea, em circuitos trifásicos, e suas aplicações para identificar fontes harmônicas dominantes em sistemas elétricos de potência. Segundo os autores, o método proposto apresenta aplicação prática simples, sendo que sua validade foi demonstrada por meio simulações. Além disso, tópicos sobre erros de medição da potência harmônica foram teoricamente discutidos.

A publicação [3] possui o objetivo de estender os entendimentos acerca da teoria de definição do direcionamento do fluxo de potência harmônica em circuitos monofásicos e trifásicos. O artigo evidenciou dificuldades associadas ao estabelecimento das fontes de distorções geradoras de distorções em sistemas elétricos a partir dessa técnica, uma vez

que a direção do fluxo de harmônicos pode mudar constantemente devido às variações do ângulo de disparo de conversores e outros tipos de cargas não lineares que apresentam alterações em seu perfil de maneira imprevisível.

No trabalho [4] é apresentado um procedimento, baseado na análise das Séries de Fourier e, também, na direcionalidade do fluxo de potência harmônica. Para ilustrar a aplicabilidade da técnica proposta, simulações computacionais são realizadas e discutidas. Enquanto, em [5] se propõe a analisar a validade da detecção da localização de fontes harmônicas a partir do método do fluxo de potência. Os problemas e as fragilidades associados à metodologia em foco foram evidenciados a partir de desenvolvimentos matemáticos e, além disso, diferentes investigações foram conduzidas em estudos de caso.

A publicação [6] exibe uma metodologia para detecção de fontes de distorções harmônicas a partir da análise do sinal (positivo/negativo) do fluxo de potência harmônica ativa. Nesse sentido, trabalhos de simulações computacionais foram discutidos com o intuito de validar a proposição. Já [7] tem o objetivo de apresentar o projeto de um sistema de detecção de fontes harmônicas em complexos elétricos, a partir da análise de fluxos harmônicos, com uma técnica nomeada de rede de correlação em cascata. O artigo evidenciou, assim, os fundamentos teóricos do procedimento proposto para detecção de cargas geradoras de distorções, o processo de treinamento da rede de conexão em cascata e a sua aplicação em simulações computacionais usando como base o sistema de 14 barras do IEEE. Segundo os autores, a técnica permite otimizar o processo de medição, diminuindo os pontos de alocação de medidores de qualidade da energia.

Ainda em termos internacionais, a pesquisa contida em [8] possui evidência as principais fragilidades associadas ao método do fluxo de potência harmônica para identificação da fonte dominante de distorções. Dessa forma, em um primeiro momento, o artigo exibiu o desenvolvimento matemático das equações relacionadas, seguido de simulações computacionais e ensaios laboratoriais capazes de clarear aspectos essenciais acerca da eficácia da metodologia em questão.

No contexto nacional, a referência [9] apresenta proposição desta metodologia como forma de definir a fonte majoritária das distorções constatadas em um determinado ponto de acoplamento. Nesse contexto, além da exposição dos fundamentos do método, foi feita a avaliação de desempenho do mesmo a partir de trabalhos de simulação computacional e ensaios laboratoriais. Em [10], dentro da perspectiva de definir maneiras para realização do compartilhamento de responsabilidades, este trabalho avança na direção também de avaliar o método ora focado. Para isso, foram expostas diferentes análises conduzidas a partir de simulações e investigações experimentais.

B. Método da Corrente Conforme e Não Conforme

Para a metodologia em questão, o trabalho [11] realiza uma primeira apresentação do processo de separação das contribuições harmônicas entre o sistema supridor e o consumidor. O procedimento que foi proposto se baseia na separação das cargas em um grupo causador de distorções e um grupo não causador de distorções harmônicas. Dentro dessa perspectiva, os fundamentos teóricos do método foram exibidos e distintos exemplos de aplicação foram trabalhados. Complementarmente, o artigo [12] avança no sentido de

separar as correntes em uma parcela dita conforme e outra nomeada não conforme. O método apresentado se compromete em compartilhar responsabilidades para distintos distúrbios da qualidade da energia, quais sejam: distorções harmônicas, desequilíbrios e flutuações de tensão. Além dos aspectos teóricos associados à metodologia, foram evidenciadas diversas simulações para ilustrar a aplicação da mesma.

A referência [13] apresenta um procedimento baseado em um refinamento do método da corrente conforme e não conforme. Ademais, a proposição também considera, em sua análise, o sinal da potência harmônica ativa. Além dos fundamentos das metodologias, o artigo exibiu um diagrama de decisões que culmina na conclusão acerca da identificação da responsabilidade harmônica de determinado sistema.

Já na referência [14] procurou sintetizar e avaliar os fundamentos teóricos do método desta metodologia de compartilhamento. Além da descrição do procedimento, o artigo exibiu as fragilidades do mesmo, a partir de testes feitos em simulações computacionais e em escala laboratorial.

C. Método da Superposição

A primeira referência relacionada à esta metodologia é a [15], a qual apresenta o processo para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas baseada no princípio da superposição de circuitos elétricos. O artigo exibiu os fundamentos teóricos do método, considerando diferentes possibilidades de caracterização das impedâncias que constituem o complexo elétrico em análise, e trabalhou em estudos de caso para evidenciar a aplicação do procedimento. Além disso, foram feitas considerações a respeito de questões ligadas à implementação prática do processo. Na sequência, em [16], a metodologia também é detalhada, em aspectos teóricos, e aplicada em estudos de caso. O artigo discutiu, ainda, aspectos práticos e a sensibilidade da metodologia com relação a diferentes fatores, como os efeitos da mudança dos ângulos de fase de harmônicas, os erros de equipamentos de medição, as ressonâncias e o cancelamento de correntes.

Em [17] é apresentado um estudo de caso que envolve a realização do compartilhamento de responsabilidades entre concessionária e um consumidor, constituído por cargas lineares e não lineares, alimentado por um barramento de 13,8 kV, pré-distorcido, em um sistema elétrico real. O artigo abrangeu uma proposição para modelagem da carga estudada e, em seguida, evidenciou o método da superposição como forma de realizar o compartilhamento de harmônicos. Os resultados obtidos para o procedimento foram expostos e discutidos. Já em [18] é exibido uma modelagem de uma carga, a obtenção de sua impedância harmônica e a realização do compartilhamento de responsabilidades, entre essa carga e a concessionária, a partir do método da Superposição. Os desenvolvimentos foram feitos em uma instalação industrial real, constituída por considerável parcela de carga de característica não linear. Por fim, foram tecidas as conclusões acerca da eficácia do procedimento.

A publicação [19] se propõe a realizar uma avaliação crítica do desempenho desta metodologia via dois caminhos: um com foco nas componentes das correntes harmônicas junto ao ponto de acoplamento comum e outro fundamentado nas componentes de tensão. A partir da avaliação de um arranjo elétrico teste, foram feitas análises que conduziram a conclusões associadas ao procedimento mais adequado diante

das recomendações contidas em documentos normativos. Em [20] há um aprofundamento na análise do método da superposição, ressaltando, de modo especial, a superposição de correntes. Assim, foram salientadas supostas fragilidades associadas à técnica, a partir de análises computacionais.

O trabalho [21] prossegue nas análises relacionadas à esta metodologia, tendo como ponto de vista a adequação, as características e as diferenças existentes entre a realização do procedimento para tensões ou correntes harmônicas. As discussões foram apresentadas com base na realização de um estudo de caso, conduzido a partir de simulações. Já a referência [22] objetiva ressaltar a problemática do compartilhamento de responsabilidades dentro do contexto do aumento da conexão, em complexos elétricos, de sistemas de geração de energia com base em fontes renováveis. Dessa maneira, utilizando-se do método da superposição, o trabalho apresentou um estudo completo acerca do processo de compartilhamento entre um sistema e um parque eólico. As modelagens e simulações foram feitas computacionalmente, e seus desdobramentos foram amplamente discutidos.

Em [23] é apresentado um primeiro estudo nacional ligada à esta metodologia em questão, o qual propicia a obtenção das impedâncias harmônicas da carga, com vistas à posterior aplicação da metodologia. No trabalho são exibidas avaliações computacionais e laboratoriais do procedimento. Em [24] tem-se uma proposta de modelagem da carga de consumidores com o intuito de obter a impedância harmônica. A metodologia foi avaliada e os resultados computacionais discutidos.

A publicação [25] evidencia os avanços conseguidos, na época, para o estabelecimento de um procedimento sistematizado para a realização do compartilhamento de responsabilidades fundamentado no método da superposição. O artigo apresenta também uma metodologia para obter as impedâncias harmônicas próprias ao sistema. O procedimento foi testado por meio de estudos computacionais e os resultados foram discutidos. O artigo [26] apresenta uma proposição para modelar a carga de consumidores com o objetivo de obter a impedância harmônica da mesma. O procedimento foi testado por meio de ensaios laboratoriais e os resultados discutidos.

Tem-se em [27] um documento que dá prosseguimento à perspectiva de consolidar uma metodologia para o compartilhamento de responsabilidades, baseado no princípio da Superposição, com uma abordagem acerca da modelagem de cargas para obtenção de impedâncias harmônicas. O trabalho ilustrou a aplicabilidade da proposta apresentada por meio de ensaios laboratoriais. O trabalho [28] demonstra a aplicação de tal método e também uma proposição para modelagem de cargas visando à obtenção de impedâncias harmônicas. O método é aplicado em uma instalação industrial real, alimentada em 230 kV, e constituída por conjuntos de cargas lineares e não-lineares. Os resultados obtidos foram discutidos com foco na análise da consistência da metodologia.

A referência [29] se preocupa em analisar o método da superposição de correntes para o compartilhamento de responsabilidades. Nesse sentido, o trabalho exibiu os fundamentos matemáticos e físicos associados ao procedimento, e realizou uma avaliação crítica do desempenho do método, mostrando suas supostas fragilidades e evidenciando os desafios que ainda se fazem presentes. Por fim, em [30] há uma investigação da questão do emprego do método da superposição de tensões e correntes para realização do compartilhamento. Tendo por base simulações

computacionais, os estudos procuraram mostrar as consequências do fato de a superposição de tensões ser fortemente influenciada por características da topologia dos sistemas elétricos, diferentemente do que ocorre quando se trabalha com as componentes de correntes.

D. Método da Superposição Modificado

O método da superposição modificado, primeiramente apresentado na tese [31], oferecer meios para contornar as dificuldades associadas à necessidade do conhecimento prévio das impedâncias harmônicas da rede e concessionária, para aplicação do método da superposição tradicional. Nesse sentido, esta tese apresenta os fundamentos físicos do método e avança na direção da validação e consolidação da nova proposta metodológica, a qual usa uma impedância dominante no ponto de acoplamento para efetivar o compartilhamento.

Em [32] é explorado, em âmbito laboratorial, o método da superposição modificado, as conclusões são tiradas a partir das respostas fornecidas pelo mesmo. Por outro lado, em [33] o método em questão é avaliado tendo em vista os fins aqui almejados. Assim, são apresentados distintos estudos relacionados à avaliação e consolidação da proposta.

O trabalho [34] tem o objetivo de avaliar as principais estratégias voltadas para a obtenção das impedâncias dominantes, necessárias para a aplicação método da superposição modificado. Para isso, foram feitas diferentes análises em simulações computacionais considerando um sistema elétrico teste. Já em [35] procurou-se divulgar o método aqui posto como meio eficaz para o compartilhamento de responsabilidades. Assim, foram evidenciados seus fundamentos, bem como sua aplicação em diferentes condições envolvendo simulações e ensaios laboratoriais. Nesta mesma linha, em [36] procurou-se exibir um estudo relacionado ao processo de obtenção de impedâncias dominantes visando a aplicação do método. Assim, por meio de estudos de caso, foram ressaltadas as limitações e as potencialidades de distintos arranjos de impedância. Tal avaliação teve progresso também em [37], com implementação de impedâncias dominantes via filtros sintonizados e amortecidos. A partir da realização de diferentes simulações computacionais, foi possível constatar uma primeira ideia acerca da sensibilidade do método quanto a alterações no “nível de dominância” da impedância.

O artigo [38] apresenta a fundamentação teórica relacionada ao método da superposição modificado e avança no sentido da validação e avaliação do mesmo. Para isso, foram feitas montagens laboratoriais com características consoantes a de sistemas reais, em diferentes condições de operação. Enquanto, em [39] há a discussão do processo como forma de contornar as dificuldades práticas de implementação do compartilhamento. Nesse sentido, todos os fundamentos físicos e matemáticos atrelados ao método são detalhados.

A metodologia em questão é mais uma vez analisada em [40], com simulações computacionais no sistema de 14 barras do IEEE. Em [41] o método tem seu desempenho avaliado via estudos de casos computacionais mais avançados.

E. Avaliação de Desempenho de Métodos

O trabalho [42] possui o intuito de sintetizar os principais processo de compartilhamento de responsabilidades,

considerando as seguintes propostas de compartilhamento encontradas na literatura, quais sejam: Método da Potência Harmônica, Método da Corrente Conforme e Não-conforme e Método da Superposição. Dessa forma, utilizando-se procedimentos experimentais e computacionais, procedeu-se à avaliação e análise crítica dos procedimentos sugeridos, destacando suas potencialidades e limitações.

Em [43] é apresentado as bases de distintos procedimentos, exibindo estudos investigativos com destaque às vantagens e dificuldades das propostas. Complementarmente, o artigo [44] também sintetiza os principais procedimentos encontrados na literatura para fins de compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas e, em seguida, realiza estudos computacionais de desempenho dos mesmos, empregando o arranjo elétrico de 14 barras do padrão IEEE. Nesse sentido, foi possível caracterizar as características das metodologias analisadas, bem como identificar caminhos encorajadores de investigação, na busca da efetiva solução da problemática.

O trabalho [45] não trata especificamente de metodologias relacionadas ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, mas aborda questões de cunho geral no que tange à presença e quantificação de harmônicas em sistemas elétricos. Nesse sentido, foi percorrido um completo panorama acerca de pontos técnicos ligados ao comportamento de potências na presença de sinais não senoidais, dificuldades inerentes aos processos de medição e a faceta econômica da alocação de harmônicos. O artigo ressaltou, ainda, a necessidade de se realizar investigações para se bem definir quais grandezas físicas devem ser monitoradas no contexto da qualidade da energia, e de que forma isso deve ser feito.

Tem-se em [46] uma pesquisa com o objetivo de apresentar alguns problemas relacionados ao compartilhamento de responsabilidades, e interpretar características de proposições existentes na literatura. Assim, a partir de um exemplo teste, foram descritos os princípios, propriedades e aplicações de procedimentos nomeados pelo autor como: Método da Impedância Crítica, índice baseado em medições multipontos, Método da Poluição Harmônica e análises embasadas em outros indicadores. Já o artigo [47] visa concretizar uma investigação laboratorial do desempenho das metodologias trabalhadas no artigo referenciado em [46]. Dessa forma, foram detalhadas discussões acerca das respostas fornecidas pelos procedimentos em foco. Para realização dos ensaios, foi elaborada uma configuração com duas cargas causadoras de distúrbios que se encontravam acopladas por meios mecânicos e elétricos.

Em [48] é realizado a simulação de um sistema elétrico teste, com características consoantes a complexos reais, para a avaliação de desempenho de métodos destinados à partição de harmônicos. Os seguintes métodos tiveram seus fundamentos detalhados: Fluxo de Potência Harmônica, Corrente Conforme e Não Conforme, Superposição e Análise dos Espectros de Frequência. Em seguida, foi discutido e avaliado o desempenho dos mesmos. Por fim, em [49] é promovida uma ampla discussão acerca do atual panorama atrelado à problemática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. O artigo pontuou uma visão geral sobre aspectos relacionados ao fato de que, embora existam diversas propostas para solução do desafio, ainda há uma grande lacuna quando se pensa na efetividade de tais proposições. Foram discutidas, dentro desse contexto, questões associadas ao significado físico do problema,

documentos normativos e interpretação dos princípios que norteiam os métodos existentes para a identificação de fontes harmônicas.

Dentro do elenco de direcionamentos aqui reportados, é oportuno salientar que o método da superposição modificado se destaca perante os demais por diversas características, como confiabilidade, consistência física e capacidade de contornar dificuldades de implementação em campo. Tomando por base os princípios estabelecidos pela metodologia, em que pese as perspectivas promissoras encontradas nos desenvolvimentos básicos e ainda restritos a concepções de cunho teórico, fica evidente a necessidade de buscar meios para aprimoramentos, consolidação de cunho teórico computacional/laboratorial e, por fim, a constatação da factibilidade aplicativa para as mais diversas situações encontradas nas redes elétricas.

IV. CONCLUSÕES

À luz das considerações feitas, fica evidenciado a riqueza de material bibliográfico encontrado, trabalhos estes que representam frutos de pesquisas que vêm sendo realizadas há décadas. Não obstante ao expressivo número de documentos levantados, nota-se que a problemática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas ainda representa um desafio inacabado no contexto da qualidade da energia elétrica. Em assim sendo, fica evidenciado a necessidade de pesquisas para o oferecimento de efetivas contribuição para o estabelecimento de procedimentos com sólida sustentação nos conceitos físicos e teóricos, corroborados com o desenvolvimento de um processo prático e sistematizado para a determinação das contribuições dos agentes envolvidos na composição das distorções harmônicas presentes num dado barramento das redes elétricas.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam agradecimento à NEOENERGIA (P&D ANEEL 7284-0001/2016), à FAPEMIG e ao CNPq, pelo suporte financeiro dado à pesquisa em questão.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] L. Cristaldi, A. Ferrero, "Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 3, 1995.
- [2] T. Tanaka, H. Akagi, "A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 4, 1995.
- [3] P. H. Swart, V. Wyk, M. J. Case, "On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks," *IEEE Trans. on Electrical Power*, vol. 6, no. 6, 1996.
- [4] A. Leiria, A. Marched, M. T. C. Barros, "Identification of Harmonic Content and their Origin in Power Networks," *IEEE NOLGNA PowerTech Conference*, Bologna, 2003.
- [5] W. Xu, X. Liu, Y. Liu, "An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, 2003.
- [6] R. Azouaou, S. Rabahallah, S. Leulmi, "Study of the Direction of the Harmonic Injections in the Electrical Power Systems," *Universities Power Engineering Conference*, Bristol, 2004.
- [7] W. M. Lin, C. H. Lin, D. P. Tu, C. H. Wu, "Multiple Harmonic Source Detection and Equipment Identification With Cascade Correlation Network," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, 2005.
- [8] I. N. Santos, J. C. Oliveira, S. F. P. Silva, "Critical Evaluation of the Performance of the Method of Harmonic Power Flow to Determine the Dominant Source of Distortion," *IEEE Latin America Transaction*, vol. 9, no. 5, 2011.

- [9] I. N. Santos, J. C. Oliveira, S. F. P. Silva, "Avaliação do Método do Fluxo de Potência Harmônica para a Identificação da Fonte de Distorção Dominante," *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Cuiabá, 2011.
- [10] I. N. Santos, J. C. Oliveira, S. F. P. Silva, "Critical Analysis of the Harmonic Power Flow Method to Determine the Dominant Distortion Source," *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, Natal, 2011.
- [11] K. Srinivasan, "On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions," *IEEE Tans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, 1996.
- [12] K. Srinivasan, R. Jutras, "Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems," *IEEE Tans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, 1998.
- [13] M. G. Ippolito, G. Moran, F. Russo, "Contribution to Solve the Problem of Attributing Harmonic Distortion Responsibility," *18th International Conference on Electricity Distribution*, Turin, 2005.
- [14] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, C. E. Tavares "Avaliação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Foz do Iguaçu, 2014.
- [15] W. Xu, Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications," *IEEE Panel on Harmonic Measurements and Allocation*, 1999.
- [16] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Tans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, 2000.
- [17] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, 2008.
- [18] F. H. Costa, I. N. Santos, S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "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, 2009.
- [19] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Análise da Metodologia da Superposição para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Sobreposições de Correntes e Tensões," *International Conference on Industry Applications*, São Paulo, 2010.
- [20] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Análise de Desempenho do Método da Superposição de Correntes para Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas," *Transmission and Distributio Conference IEEE/PES Latin America*, São Paulo, 2010.
- [21] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Critical Analysis of the Current and Voltage Superposition Approaches at Sharing Harmonic Distortion Responsibility," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 9, no. 4, 2011.
- [22] I. N. Santos, et al., "Applying the Superposition Procedure for the Harmonic Sharing Responsibility between Renewable Energy Power Plants and the Network," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 15, 2014.
- [23] S. F. P. Silva, "Uma Proposta para o Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Tese de Doutorado – UFU*, 2007.
- [24] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "Uma Proposta de Sistematização da Atribuição de Responsabilidade sobre Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência," *Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Belém, 2005.
- [25] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "Uma Contribuição à Questão do Compartilhamento da Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Campina Grande, 2006.
- [26] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "Avaliação de Desempenho de Metodologia para a Definição das Parcelas de Responsabilidade entre Supridor e Consumidor sobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos," *Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica*, Santos, 2007.
- [27] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "Uma Proposta de Separação das Parcelas de Responsabilidades entre Consumidor e Concessionária na Questão das Distorções Harmônicas," *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, 2007.
- [28] S. F. P. Silva, I. N. Santos, F. H. Costa, C. G. Damasceno, J. C. Oliveira, "Metodologia para a Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas: Análise de um Caso Real," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belo Horizonte, 2008.
- [29] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Avaliação Crítica do Método de Superposição de Correntes com vistas à Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas," *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, 2010.
- [30] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "Uma Reflexão sobre o Emprego do Método da Superposição via Tensões ou Correntes para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal, 2016.
- [31] I. N. Santos, "Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas," *Tese de Doutorado – UFU*, 2011.
- [32] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Validação Experimental de Uma Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Conferencia de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, 2011.
- [33] I. N. Santos, J. C. Oliveira, J. R. M. Junior "Uma Proposta de Metodologia para Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas utilizando o Princípio da Superposição," *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, 2011.
- [34] I. N. Santos, A. Reis, J. C. Oliveira, "Estudos Relacionados à Obtenção da Impedância Harmônica Dominante com Vistas à Aplicação do Método da Superposição Modificado," *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, 2012.
- [35] I. N. Santos, J. C. Oliveira, J. R. M. Junior, "Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Revista Controle e Automação*, vol. 23, no. 6, 2012.
- [36] I. N. Santos, A. Reis, J. C. Oliveira, "Avaliação das Estratégias para Obtenção da Impedância Harmônica Dominante com Vistas à Implementação do Método da Superposição Modificado," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Goiânia, 2012.
- [37] A. C. Santos, I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Análise de Desempenho do Método da Superposição Modificado para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Campina Grande, 2015.
- [38] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Avaliação Laboratorial de uma Nova Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*, Mar del Plata, 2011.
- [39] I. N. Santos, J. C. Oliveira, J. R. M. Junior "Modified Superposition Method for Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions," *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, Lisboa, 2011.
- [40] I. N. Santos, A. Reis, J. C. Oliveira, "Método da Superposição Modificado para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas - Estudos no Sistema de 14 Barras do IEEE," *International Conference on Industry Applications*, Fortaleza, 2012.
- [41] I. N. Santos, J. C. Oliveira, "A Proposal of Methodology for the Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions Using the Superposition Principle," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 8, 2014.
- [42] I. N. Santos, "Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas," *Dissertação de Mestrado – UFU*, 2007.
- [43] I. N. Santos, J. C. Oliveira, S. F. P. Silva, "Uma Análise Crítica das Principais Propostas para Atribuição de Responsabilidades na Questão das Distorções Harmônicas," *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, 2007.
- [44] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "Análise de Desempenho das Principais Metodologias para o Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas," *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, 2015.
- [45] A. E. Emanuel, "Harmonic Cost Allocation: a Difficult Task," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, 1999.
- [46] A. Pavas, V. Staudtt, G. T. Sanchez, "Discussion on Existing Methodologies for the Responsibilities Assignment Problem," *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, 2008.
- [47] A. Pavas, V. Staudtt, G. T. Sanchez, "Experimental Investigation of existing Methodologies for the Responsibilities Assignment Problem," *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, 2009.
- [48] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "A Comparative Analysis between Methodologies for Responsibility Assignment on Harmonic Distortions," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, La Coruña, 2015.
- [49] S. Cieslik, "On the Problem of Harmonic Source Detection in Electric Power Networks," *10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, Bydgoszcz, 2016.