

Validação Experimental do Método de Chaveamento de Capacitores para Determinação do Compartilhamento de Responsabilidades de Distorções Harmônicas

Mateus Duarte Teixeira
Institutos Lactec
mateus.teixeira@lactec.org.br

Rodrigo Jardim Riella
Institutos Lactec
riella@lactec.org.br

Rafael Radaskievicz
Copel Distribuição
rafael.radaskievicz@copel.com

Resumo — A presença de distorções harmônicas em instalações elétricas produz efeitos indesejados, que deterioram a qualidade e a condição operativa de instalações elétricas. Segregar responsabilidades quando da constatação de tal fenômeno num ponto de acoplamento comum (PAC) ainda se coloca como um desafio a ser suplantado. Neste contexto, o presente trabalho propõe uma validação experimental de um método, denominado chaveamento de capacitores, no intuito de determinar o percentual de contribuição de cada agente. A reprodução laboratorial faz uso de componentes triviais num ambiente industrial, valida algumas premissas do referido método, apresenta e discute os resultados obtidos.

Palavras-chaves — Distorções harmônicas, compartilhamento de responsabilidades, ponto de acoplamento comum, chaveamento de capacitores.

I. INTRODUÇÃO

Os distúrbios da energia elétrica são uma realidade cada vez mais presente nas redes de distribuição, tanto do ponto de vista das concessionárias quanto internamente às plantas dos consumidores. Dentre estes fenômenos nocivos, constam as distorções harmônicas, que nada mais são que a sobreposição de ondas senoidais múltiplas de uma frequência fundamental. As causas estão diretamente relacionadas a dispositivos que impõem uma relação não-linear entre tensão e corrente. Apesar de poderem ser oriundas de equipamentos presentes em qualquer instalação elétrica, como transformadores, por exemplo, uma grande parcela de contribuição diz respeito às cargas. Isto é potencializado pela presença cada vez mais massiva de equipamentos e dispositivos dotados de eletrônica de potência, tais como controladores de velocidade, lâmpadas compactas e utilidades eletrônicas em geral, em todos os segmentos de consumo de energia elétrica. Muito embora a potência individual destas cargas possa, por vezes, não ser significativa, o somatório de seus efeitos resulta em patamares significativos de correntes em frequências superiores à fundamental.

Estas formas de onda de frequência superior à nominal deturpam a forma de onda de referência, causando danos diversos às instalações elétricas, tais como superaquecimento de condutores, e, por conseguinte, redução de vida útil dos dispositivos a estas condições submetidas, falsa atuação de dispositivos de proteção, devido às alterações impostas à relação dos valores de pico e eficazes, ressonância, causada pelo casamento de impedâncias harmônicas que se anulam, ocasionando elevados patamares de tensão e/ou corrente, interferência eletromagnética e/ou nos sistemas de comunicação industriais, devido às altas frequências atingíveis, dentre outros [1].

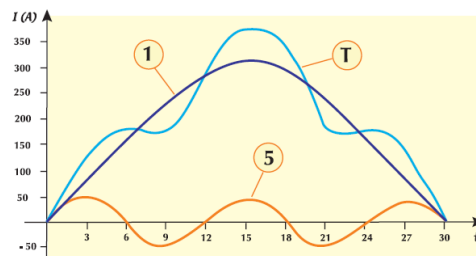


Fig. 1. Meio-ciclo de corrente distorcida pela presença de componentes harmônicas de quinta ordem [1].

O tema segregação de responsabilidades associadas à presença de correntes harmônicas nas redes elétricas fulgura como um dos principais desafios atualmente estudados mundialmente, por diversas instituições e pesquisadores, no contexto da qualidade da energia elétrica (QEE). Muito embora já tenham sido propostas técnicas específicas sobre o tema, nenhuma se apresentou de forma satisfatoriamente assertiva e aceita sem ressalvas [3].

Neste âmbito, a concretização de um método consistente e seguro que possibilite tal determinação de compartilhamento de responsabilidade se apresenta como de interesse de consumidores, concessionárias e agentes reguladores.

Fato é que alguns equipamentos de medição de harmônicos contemplam em suas funcionalidades a verificação da direção do fluxo para cada ordem harmônica, apontando se o sentido dominante se dá do consumidor para a concessionária ou vice-versa, o que não é suficiente para determinar as parcelas de contribuição. Paralelamente, diferentes publicações que visam estabelecer procedimentos para identificar a(s) fonte(s) geradora(s) de sinais distorcidos vêm sendo publicadas, tais como a proposta de segregação da corrente em parcelas conforme e não conforme [4] e a utilização do teorema da superposição dos efeitos [5], cujas fragilidades já foram refutadas por outros autores, tais como [6] e [7].

Especificamente no que diz respeito ao método da superposição convencional, relevante mencionar que o mesmo possui largo fulcro matemático, contudo, a obtenção das grandezas necessárias para sua aplicação, em especial as impedâncias harmônicas, se apresenta como sendo de elevada complexidade prática. Justamente por isso, diversos métodos se propõem à obtenção destas impedâncias, para então, se valerem dos benefícios deste conceito.

Diante deste cenário, através do constante processo de busca por metodologias que consigam suplantat esta lacuna, deve-se mencionar o método da superposição modificado [8], e ainda, no método do chaveamento capacitivo [9]. Reconhece-se notoriedade neste último, por se tratar de um trabalho bastante recente, se trata de procedimento à primeira análise factível e coerente, por fazer uso um elemento amplamente disponível no âmbito industrial, o banco de capacitores. Por meio de equacionamento comparativo entre as condições operativas de comutação do referido dispositivo, o referido trabalho possibilita determinar a impedância harmônica da unidade consumidora, possibilitando assim, a aplicação do método da superposição dos efeitos.

Contudo, como esta e outras referências se respaldam em simulações computacionais ou matemáticas, validações e análises em outras searas, tais como experimentos laboratoriais se fazem necessárias, visando justamente verificar seus benefícios e fragilidades de desempenho, para que se possa afirmar ou refutar sua eficácia para a segregação sistemática e coerente das parcelas de responsabilidade sobre os indicadores de qualidade associados às distorções harmônicas.

Conforme mencionado anteriormente, o método do chaveamento capacitivo [9] O método do chaveamento capacitivo, proposto por SANTOS (2015), se trata de uma técnica cujo fulcro metodológico se destaca por criar dois estágios operativos distintos, realizar algumas presunções para propiciar o desenvolvimento equacionamento e, ao final, usufruir da sólida e prática técnica de superposição convencional.

A referência supracitada visa suplantat a problemática da obtenção da impedância harmônica das instalações da unidade consumidora envolvida no PAC. Em síntese, o processo consiste na realização de medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de interesse, antes e após o chaveamento de um banco de capacitores.

Em consonância às ressalvas da própria autora, apesar da particularização do chaveamento de unidades capacitivas, sob o ponto de vista teórico, o chaveamento de qualquer outro componente inserido junto ao ponto de interesse, poderia, em tese, oferecer os recursos físicos necessários a aplicação do processo. Entretanto, como a presença de tais componentes é

trivial no ambiente industrial, em especial para correção do fator de potência, se entende que a adoção deste componente traz benefícios operacionais em detrimento a outros, que devem ser adicionados às instalações em estudo.

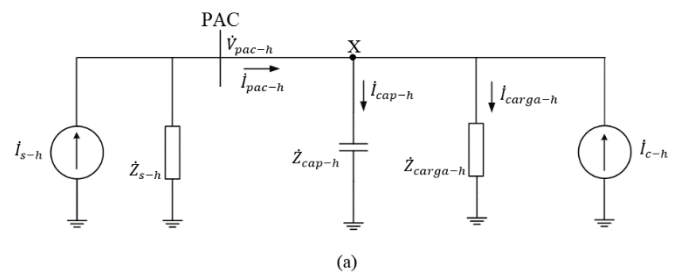
II. MÉTODO DO CHAVEAMENTO CAPACITIVO

Em síntese, a metodologia em que se fundamenta a reprodução laboratorial tem por intuito a determinação das impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora tomadas por base as análises de tensões e correntes em duas condições de funcionamento distintas do sistema elétrico sob estudo. Para isso, respeitadas as considerações anteriormente feitas quanto ao tipo de componente a ser manobrado, é necessária a realização do chaveamento de um banco de capacitores presente no ponto a partir do qual se deseja conhecer a impedância.

Outro ponto de interesse a ser ressaltado é que, dada uma instalação real, não há necessidade de se efetuar o chaveamento da capacitância total do banco presente no complexo industrial, uma vez que o chaveamento de uma quantidade de capacitores que seja capaz de ocasionar mudança nos valores de tensões e correntes no ponto em questão já é suficiente para a aplicação da metodologia. Isto se justifica pelo fato que bancos de capacitores podem se apresentar na forma de distintos estágios destinados à composição da estrutura do sistema de compensação de reativos. Caso não haja bancos de capacitores, ou ainda, por qualquer motivo, não seja interesse fazer uso dos bancos existentes para aplicação do método, é totalmente viável conectar ao PAC capacitores que não façam parte do arranjo industrial, apenas para utilização do procedimento.

Não obstante, para que os efeitos transitórios envolvidos no chaveamento de capacitores não influenciem no resultado, há de se garantir que o sistema se encontre em regime permanente, o que costuma ocorrer em frações de segundo.

Lançando mão do teorema de Norton para representação dos circuitos equivalentes dado um ponto de interesse, neste caso o PAC, onde se objetiva avaliar o quesito do rateio de responsabilidades sobre as distorções de determinada frequência harmônica h , são propostas as Fig 2(a), na qual o banco de capacitores encontra-se conectado ao PAC e 2(b), na qual o mesmo banco de capacitores foi desconectado do sistema.



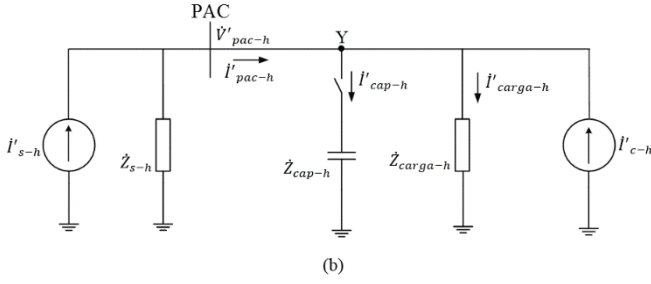


Fig. 2. Arranjo elétrico representativo do método de chaveamento capacitivo e suas duas condições operativas: (a) Banco de capacitores conectado e (b) banco de capacitores desconectado [9].

Fazendo uso da Lei de Kirchoff dos Nós ao nó X constante na Fig 2 (a), e se aplicando técnicas de resolução de circuitos elétricos, pode-se determinar que a corrente na carga, perante a condição operativa (a) é dada por (1):

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

De maneira análoga, pode-se proceder análise semelhante ao circuito representativo da condição operativa (b), resultando em (2):

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

Neste ponto a metodologia estabelece duas importantes premissas, baseadas num mesmo conceito, que são determinantes para continuidade do equacionamento proposto. Entende-se que, uma vez que as cargas não lineares presentes no arranjo estudado se comportam como fontes de corrente e, desta maneira, permanecem constantes antes e após a comutação do banco de capacitores, assume-se que $\dot{I}_{s-h} \approx \dot{I}'_{s-h}$ e $\dot{I}_{c-h} \approx \dot{I}'_{c-h}$, em outras palavras, que as correntes harmônicas de ordem h injetadas pela fonte e pela parcela não-linear da carga se mantêm constantes perante as condições operativas (a) e (b). Isto posto, torna-se possível igualar (1) e (2), de modo a obter (3):

$$\frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} + \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - \dot{I}_{pac-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - \dot{I}'_{pac-h} \quad (3)$$

Realizando apenas manipulações algébricas em (3) no intuito isolar o termo $\dot{Z}_{carga-h}$, chega-se a (4):

$$\dot{Z}_{carga-h} = \frac{(\dot{V}_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}'_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}}} \quad (4)$$

Conforme objetivado, após o desenvolvimento do equacionamento derivado do arranjo elétrico proposto, o valor da impedância harmônica da carga $\dot{Z}_{carga-h}$ foi escrito em função de variáveis conhecidas, uma vez que $\dot{V}_{pac-h}$, $\dot{V}'_{pac-h}$, $\dot{I}_{pac-h}$ e $\dot{I}'_{pac-h}$ podem ser obtidos a partir de medições no PAC, enquanto $\dot{Z}_{cap-h}$ é um valor conhecido, uma vez representa a impedância harmônica do banco de capacitor utilizado para chaveamento. Reside aqui, portanto, o grande trunfo da metodologia, que visa, justamente,

suplantar o desafio da ausência de informações para aplicação do método da superposição.

Não se pode olvidar, contudo, que o valor de impedância obtido por meio de (4), representa, meramente, o montante relacionado à carga do sistema em análise, não incluindo, portanto, o valor da reatância capacitiva comutada. Para se obter o valor total de impedância, abarcando o banco de capacitores utilizado para aplicação da metodologia, deve-se proceder a associação paralela entre $\dot{Z}_{cap-h}$ e $\dot{Z}_{carga-h}$, como preconizado em (5):

$$\dot{Z}_{carga-tot-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{Z}_{carga-h}}{\dot{Z}_{cap-h} + \dot{Z}_{carga-h}} \quad (5)$$

Conforme mencionado anteriormente, a impedância do consumidor se traduz como aquela de maior dificuldade no que tange à obtenção das variáveis necessárias para aplicação do método da superposição. Tendo em mão seu valores, os demais poderão ser obtidos diretamente, por meio de medições no PAC, ou ainda, por meio de método indiretos (impedância do supridor). Uma vez obtidas as grandezas envolvidas, a contribuição de cada agente envolvido pode ser obtida por meio da projeção dos fasores parciais sobre o fasor total, conforme exemplificado na Fig 3.

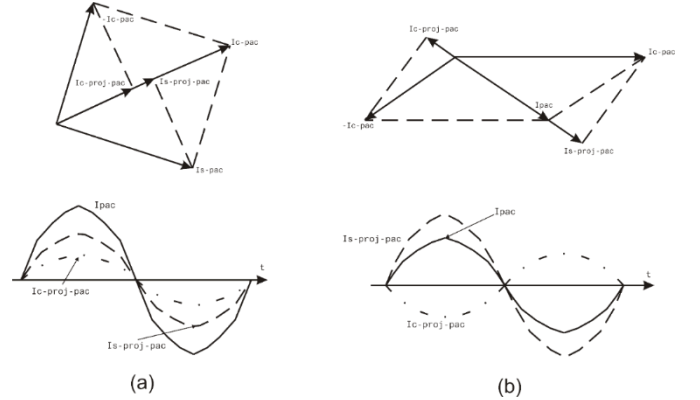


Fig. 3. Decomposição da corrente total no PAC em componente que se (a) somam (b) subtraem [5].

III. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Objetivando a reprodução física das simulações computacionais da metodologia utilizada como referência, estabeleceu-se a seguinte sequência de eventos para o ensaio laboratorial:

- Inserir uma impedância que permita o desacoplamento da fonte;
- Conectar somente a fonte a vazio e realizar medições;
- Inserir a carga e realizar nova medição no PAC;
- Conectar o banco de capacitores em paralelo à carga e proceder o ajuste da carga, se necessário, realizando nova medição no PAC e no ramo envolvendo o banco de capacitores;
- Aplicar o equacionamento proposto pelo método do chaveamento capacitivo e determinar a impedância equivalente da carga;

•Aplicar método da superposição convencional para determinar os percentuais de contribuição dos agentes envolvidos no PAC.

No intuito de tornar claros os motivos que levaram à decisão para o estabelecimento de tais etapas, destaca-se que a inserção de uma impedância entre a fonte utilizada tem por intuito proporcionar, ao final da aplicação do método, quando da aplicação da técnica da superposição dos efeitos, o conhecimento da impedância equivalente do supridor, o que não seria possível caso o arranjo laboratorial fosse conectado diretamente à fonte.

De igual maneira, a motivação para se realizar uma medição prévia à vazio, se respalda no mérito de se conhecer a característica intrínseca da fonte no que diz respeito às distorções harmônicas presentes, por mais baixas que sejam, além de tornar conhecidos os valores efetivamente fornecidos pela fonte, em alternativa à teórica.

O arranjo proposto consiste na tradução física, isto é, reproduzir os diagramas propostos nas Fig 2(a) e 2(b) fazendo uso de componentes reais. Detalhes dos trechos do circuito serão comentados no desenvolvimento deste item. O esquema geral do arranjo desenvolvido é ilustrado pela Fig 4, enquanto a tabela I apresenta a lista de materiais utilizados na composição do mesmo:

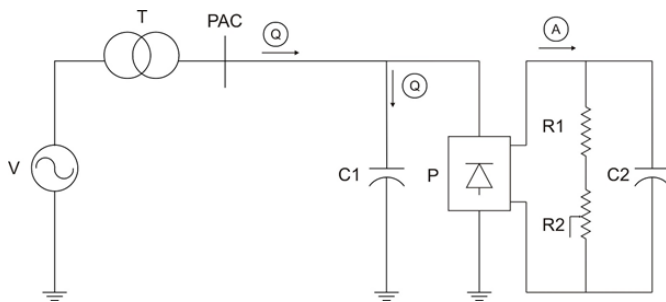


Fig. 4. Arranjo laboratorial proposto para validação do método de chaveamento capacitivo.

TABELA I. LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS NO ARRANJO LABORATORIAL.

Equipamento	Modelo	Qtde.
Fonte de Tensão	Hipotronics MTA-4 300 V/MTC	1 unidade
Transformador de Potência	WTW 15kVA 220/220 V Z=3,5%	1 unidade
Ponte Retificadora Trifásica 6 Pulsos	Semikron Semipont 3	1 unidade
Capacitor Eletrolítico	330 µF/ 400V	1 unidade
Banco de resistências	Elettron 3x10kW	1 unidade
Resistência variável	Eletele 50 Ω/500 W	1 unidade
Capacitores	Inepar 1kVAr 600V	3 unidades
Qualímetro	Fluke 438 Series	2 unidades
Alicate amperímetro	Fluke i30S	1 unidade
Cabos	2,5mm ² 750V	20 metros

Os dados gerados pelos qualímetros servirão de subsídio para aplicação do equacionamento estabelecido pelo método do chaveamento de capacitores. Adicionalmente, o objetivo do monitoramento do elo CC por meio de alicate amperímetro dotado de detecção de corrente por meio do efeito Hall, foi averiguar o montante de corrente elétrica que está sendo drenada pela carga, a fim de possibilitar que posteriormente à conexão do banco de capacitores, a mesma possa ser ajustada de modo a manter o mesmo patamar anteriormente verificado, propiciando assim a comparação entre as duas condições. Em outras palavras, a inserção do

banco de capacitores deve ser compensada. Destaca-se ainda que esta compensação deve ser sutil para não infringir algumas das premissas do método, tal como $i_{c-h} \approx i'_{c-h}$, conforme preconizado pelo método utilizado como base. Uma técnica para se determinar o valor do banco de capacitores a ser utilizado é considerar que um valor que seria utilizado para correção do fator de potência da carga.

TABELA I. LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS NO ARRANJO LABORATORIAL.

Equipamento	Modelo	Qtde.
Fonte de Tensão	Hipotronics MTA-4 300 V/MTC	1 unidade
Transformador de Potência	WTW 15kVA 220/220 V Z=3,5%	1 unidade
Ponte Retificadora Trifásica 6 Pulsos	Semikron Semipont 3	1 unidade
Capacitor Eletrolítico	330 µF/ 400V	1 unidade
Banco de resistências	Elettron 3x10kW	1 unidade
Resistência variável	Eletele 50 Ω/500 W	1 unidade
Capacitores	Inepar 1kVAr 600V	3 unidades
Qualímetro	Fluke 438 Series	2 unidades
Alicate amperímetro	Fluke i30S	1 unidade
Cabos	2,5mm ² 750V	20 metros

A fonte utilizada nos ensaios foi fabricada pela Hipotronics, modelo MTA-4-300V/MTD.5-150. Trata-se de uma fonte de tensão trifásica, com patamares de tensão parametrizáveis entre 0 e 300 V, porém sem possibilidade de controle no formato da onda (puramente senoidal, por exemplo).

Conforme mencionado anteriormente, uma vez que ao final do tratamento dos dados do ensaio, será utilizado o método da superposição convencional, o que implica na necessidade de se conhecer a impedância do ente supridor, torna-se necessária a inserção de uma impedância entre a fonte e a carga (à montante do PAC). Para tal, utilizou-se um transformador didático, trifásico, cuja relação é 1:1, potência 15 kVA e tensões nominais 220 V fase-fase. Apesar do equipamento possuir o valor da impedância percentual disponível em placa, o que propiciaria que seus valores teóricos fossem calculados, optou-se por utilizar os dados ensaiados.

Para compor a carga, que deveria ter um padrão não-linear, utilizou-se banco de resistências 3x10W ligado em série, por sua vez, ligado em série a uma resistência variável de 50 Ohms, elemento este que irá propiciar o ajuste do patamar de corrente mencionado anteriormente. Conectou-se, então, em paralelo a este circuito de resistências em série um capacitor eletrolítico de 330 µF/ 400V. Este circuito RC paralelo compõe uma carga em corrente contínua. A conexão entre o segmento de corrente contínua e o restante do circuito em corrente alternada foi realizado por meio de ponte retificadora de seis pulsos, trifásica. Destaca-se, ainda, que a própria característica do circuito retificador insere uma parcela não linear para o circuito de carga. A Fig 5 apresenta o esquema de ligação do banco de resistências em conjunto com a resistência variável, enquanto a Fig 6, demonstra a forma de ligação da ponte retificadora ao capacitor eletrolítico.



Fig. 5. Detalhe da ponte retificadora e do capacitor eletrolítico utilizado na carga.



Fig. 6. Banco de resistências 3x10kW.

Cabe reiterar que o intuito da resistência variável no arranjo tem por mérito proporcionar capacidade de ajuste da corrente de carga quando da conexão do banco de capacitores.

Para formar o banco foram conectados três capacitores de 1 kVAr/600V ligados em estrela, conforme ilustra a Fig 7 e, posteriormente, conectados no ramo correspondente ao proposto pela Fig 2(b), apresentada anteriormente, quando da reprodução da condição operativa (a), ou seja, com o banco de capacitores conectado.



Fig. 7. Detalhe da ponte retificadora e do capacitor eletrolítico utilizado na carga.

Uma vez selecionados os dispositivos que farão parte do equivalente sob ponto de vista do supridor e consumidor, iniciaram-se as execuções das etapas propostas no início deste capítulo. Inicialmente, o arranjo foi energizado à vazio, com tensão aplicada de 60 V RMS. Na sequência, após a formação da massa de dados iniciais, aplicou-se 127 V RMS. Esta sequência de dois patamares foi repetida para todas as etapas do ensaio laboratorial. O ponto do futuro PAC (até então, a vazio) foi monitorado por meio de um qualímetro que gravava as grandezas elétricas de interesse (intervalo de medição, tensões e correntes harmônicas e seus respectivos ângulos).

Manteve-se energizada e monitorada cada etapa do ensaio durante doze minutos. Os intervalos de integralização parametrizados nos qualímetros foram de um minuto, o que acarreta na obtenção de onze leituras para cada medição. As grandezas parametrizadas para gravação foram tensão, corrente harmônicas até a trigésima ordem, bem como seus respectivos ângulos, além da data e hora correspondente a cada leitura integralizada.

Posteriormente ao devido registro inicial, cuja finalidade não faz parte do método em si, mas tão somente tem por

intuito fornecer uma característica intrínseca da fonte, partiu-se então para a etapa correspondente à condição operativa (b), realizada preliminarmente por questões de conveniência.

Nesta etapa também foi monitorada a corrente no elo de corrente contínua, a fim de propiciar o comparativo para a condição operativa que contém a conexão do banco de capacitores.

Decorrido o tempo pré-estabelecido, conectou-se então o banco de capacitores ao ramo correspondente, a fim de reproduzir a condição operativa (a). Nesta etapa, monitorou-se novamente o PAC e, agora, o ramo que continha o banco de capacitores, ponto onde foi inserido um segundo qualímetro, a fim de gerar massa de dados deste segmento do circuito para eventuais confrontamentos de dados. Imediatamente após à conexão do banco de capacitores, monitorou-se a corrente no elo de corrente contínua, a fim de se comparar com o valor outrora verificado e, assim, garantir a comparabilidade. Foram realizados ajustes na resistência variável almejando a manutenção do mesmo patamar de corrente verificado anteriormente, que permeava 4,19A.

De posse das grandezas monitoradas, foram extraídos os arquivos dos dois qualímetros utilizados. Em tempo, destaca-se que as grandezas monitoradas foram magnitudes de tensões de fase e correntes fundamentais, e seus respectivos ângulos, bem como as mesmas grandezas harmônicas, em função da fundamental (percentual). Os ângulos, obviamente, não estavam referenciados à fundamental.

Uma vez disponíveis em formato eletrônico público, foram tabulados a fim de se obter os valores médios do período monitorado, valores estes utilizados em todo e qualquer tratamento matemático das grandezas envolvidas.

Além das grandezas geradas pelo monitoramento dos qualímetros, também foram realizados cálculos para obtenção de dados verossímeis de outros componentes do arranjo, tais como impedância do transformador utilizado como representando o supridor, e ainda, dos capacitores que compõe o banco.

Por fim, aplicou-se o equacionamento proposto pelo método de referência objetivando a determinação das variáveis de interesse para aplicação do método da superposição convencional.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira análise se dedicou à avaliação dos patamares de magnitude de ângulo das correntes fundamental e harmônicas, antes e após a inserção do banco de capacitores. Os valores para corrente I_{pac-h} , correspondente à condição operativa em que o capacitor está conectado e da corrente I'_{pac-h} , que se refere à situação operativa com o capacitor desconectado, foram confrontados e o seu Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA) calculado conforme descrito em (6). O resultado desta variação é apresentado pela tabela II. Ressalta-se que as tabelas aqui apresentadas abrangem apenas as ordens harmônicas ímpares e são limitadas até a 13ª ordem harmônica, tanto para facilitar a diagramação e leitura do presente trabalho, quanto pela baixa representatividade das demais ordens.

$$EMPA = \frac{\sum_{i=1}^n |EP_i|}{n} \quad (6)$$

Onde:

E_{Pi} = erro percentual do elemento de ordem i;
n = quantidade de elementos observados.

TABELA II. VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES POR FASE DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC.

Orde m h	Suprid or (%)	Consumi dor (%)	Suprid or (%)	Consumi dor (%)	Suprid or (%)	Consumi dor (%)
3	58,72	41,28	8,45	91,55	42,96	57,04
5	38,60	61,40	36,96	63,04	32,47	67,53
7	16,02	83,98	51,66	48,34	56,26	43,74
9	61,63	38,37	43,22	56,78	38,29	61,71

Conforme apresentado no capítulo anterior, a fonte possui uma distorção intrínseca, o que faz com que este resultado de compartilhamento na contribuição na distorção verificada no PAC fosse esperado.

Contudo, verifica-se também que existe uma grande disparidade entre fases de uma mesma ordem harmônica. As hipóteses para tal podem ter diversas origens, tais como: real desequilíbrio na carga, devido ao comportamento do chaveamento da ponte retificadora a seis pulsos, posição e compatibilidade dos sensores de corrente utilizados, resíduos de erros acumulados durante os tratamentos equacionais dos dados e existência física de parcelas de perdas.

V. OBSERVAÇÕES FINAIS

O presente trabalho elencou o método do chaveamento capacitivo para realização de uma validação experimental, uma vez que o mesmo possui requisitos que atendem aos preceitos necessários para inspirar confiança e, que por se tratar de uma técnica, até então, testada apenas na esfera das simulações computacionais, merece dispêndio de esforços que a levem a uma reprodução física.

Tal reprodução foi realizada por meio da proposição de um arranjo laboratorial dotado de componentes facilmente encontrados em instalações industriais e aderentes ao recomendado pela referência adotada.

Sob este arranjo, foram realizados experimentos visando reproduzir as condições operativas propostas pelo método. Fazendo uso das premissas e do equacionamento preconizado, realizaram-se confrontamentos de dados obtidos e esperados, o que validou o modelo desenvolvido.

Perante os resultados obtidos com este trabalho, cria-se uma nova perspectiva de aplicação do método do chaveamento capacitivo para determinação do percentual de responsabilidades atinentes às distorções harmônicas constatadas num PAC. Por meio do equacionamento adotado, torna-se possível a obtenção da impedância harmônica do consumidor, variável fundamental para aplicação do método da superposição clássico. Ademais, constatou-se que as premissas impostas pelo método foram, de fato, atendidas.

Contudo, devido a limitações de infraestrutura laboratoriais, não foi possível a obtenção de um gabarito, a fim de se comprovar a verossimilidade dos dados obtidos. Tal impasse poderia ser dissoluto pela disponibilidade de uma fonte com controle na forma de onda da tensão (puramente senoidal, por exemplo) uma avaliação do resultado do método perante uma condição de total responsabilidade do consumidor não pôde ser realizada, muito embora, a condição ensaiada seja um cenário teoricamente mais complexo, uma vez que existem fluxos e contribuições mútuas entre os dois agentes envolvidos.

Uma vez que o conceito matemático aplicado se estende a toda e qualquer condição operativa, deposita-se grande confiança na reprodutibilidade do método proposto, sendo que realização de novos ensaios dispondo de fontes de suprimento com controle na forma de onda aplicada poderão corroborar tal expectativa.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] R.C., Dugan, R. C.; M.F., McGranaghn, S. Santoso, W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality – Third Edition, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções. São Paulo, 2001.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Anexo I da Nota Técnica 105/2014 -SRD/ANEEL - Relatório 5 - Nota Técnica 105/2014-SRD/ANEEL". Brasília, 2014.
- [4] K. Srinivasan, R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [5] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling". IEEE Transactions Power Delivery, v. 15, n. 2, p. 804-811, 2000.
- [6] F.H. Costa, "Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas". 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, 2009.
- [7] J.C. Oliveira, A.C. Santos, I.N. Santos, C.E. Tavares, "Avaliação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas". Trabalho apresentado no 5º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, 2014.
- [8] A.C. Santos, "Uma Contribuição Ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas Via Chaveamento de Unidades Capacitivas" 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, 2015.
- [9] I.N. Santos, "Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas". Tese (Doutorado). – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.