

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

RAFAEL RADASKIEVICZ

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO DE
CAPACITORES PARA DETERMINAÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DE
RESPONSABILIDADES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

CURITIBA

2017

RAFAEL RADASKIEVICZ

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO DE
CAPACITORES PARA DETERMINAÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DE
RESPONSABILIDADES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração em SECA, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella
Coorientador: Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira

CURITIBA

2017

R124v Radaskievicz, Ragafel
Validação experimental do método de chaveamento de capacitores para determinação do compartilhamento de responsabilidades de distorções harmônicas / Rafael Radaskievicz. – Curitiba, 2017.
100 f. il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella.
Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2016.
Inclui Referências bibliográficas.

1. Distorções harmônicas. 2. Compartilhamento de responsabilidades. 3. Ponto de acoplamento comum. 4. Chaveamento de capacitores. I. Riella, Rodrigo Jardim. II. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Institutos Lactec – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. III. Título.
CDD 621.3191

TERMO DE APROVAÇÃO


RAFAEL RADASKIEVICZ

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO DE CAPACITORES PARA DETERMINAÇÃO DO COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos Lactec) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:


ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos Lactec)


Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos Lactec)


Prof. Dr. Cresencio Silvio Segura Salas
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos Lactec)


Prof. Dr. Ivan Nunes Santos
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Curitiba, 23 de fevereiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a minha família: Roxelane Bontorin, esposa amada, e Henrique Luiz Bontorin Radaskievicz, filho, nascido no início da jornada deste mestrado, sem os quais não teria a mesma motivação para persistir nos momentos de dificuldades.

Agradeço ao meu orientador, Rodrigo Jardim Riella, bem como ao coorientador, Mateus Duarte Teixeira, por todos incentivos e apoio prestados durante a elaboração desta dissertação.

Estendo meus agradecimentos ao colega do Lactec, Pedro Augustho Biasuz Block, pelo auxílio durante a execução dos ensaios laboratoriais.

A todos os colegas e professores da 9ª Turma do Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia, pelas trocas de experiências e aprendizados mútuos durante o curso das disciplinas.

A todos os pesquisadores que permearam temas correlatos, propiciando embasamento para realização deste trabalho.

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.

(Nikola Tesla)

RESUMO

Dentre os distúrbios que podem afetar a qualidade da energia elétrica, estão as distorções harmônicas. A presença deste fenômeno produz efeitos indesejados, tais como sobreaquecimento de condutores (causado pelo efeito pelicular), atuações indevidas das proteções (alterações no valor de pico), ressonância, vibrações, aumento da queda de tensão e exasperação da tensão neutro-terra. Tais situações não possuem maiores dificuldades em serem constatadas, uma vez que atualmente, dispõe-se de qualímetros capazes não só de mensurá-las, mas até mesmo, de indicar um eventual fluxo de predominância quando da realização de medição num ponto de acoplamento comum (PAC) entre determinado consumidor e distribuidora de energia elétrica. Entretanto, apesar de diversas publicações concernentes ao tema, ainda inexiste um método que possa ser considerado assertivo no que diz respeito à segregação de percentuais de responsabilidade pela distorção harmônica constatada no PAC. Tendo em vista a cada vez mais proeminente necessidade de atribuição de papéis claros, sob ponto de vista técnico e regulatório, uma vez que por meio destes seria possível imputar responsabilidades acerca da mitigação das fontes do distúrbio. Este trabalho realiza um apanhado geral acerca dos principais métodos que se propuseram a suplantam esta problemática, realizando um comparativo entre os mesmos. Baseado neste comparativo foi selecionado o método denominado chaveamento capacitivo para proposição de um arranjo laboratorial objetivando validação experimental. Uma vez que o escopo do trabalho de referência se ateve ao âmbito das simulações computacionais. O arranjo é desenvolvido se utilizando de equipamentos e dispositivos trivialmente encontrados em instalações industriais, uma vez que a aplicação prática foi uma das premissas para seleção do método. Com a aplicação do equacionamento proposto, torna-se possível a obtenção da impedância harmônica da carga, possibilitando assim, a aplicação do método da superposição dos efeitos, de igual maneira ao trabalho utilizado como base. Como resultados, reproduz em ambiente laboratorial um arranjo análogo ao simulado computacionalmente, detalhando os critérios e características para elaboração do mesmo, demonstrando a viabilidade de tal proposta. As premissas estabelecidas pelo método de referência são corroboradas por meio de indicadores e confrontamentos de dados, e, por fim, apresenta a viabilidade da aplicação do método na determinação das proporções de responsabilidade para um caso prático de distorção harmônica envolvendo dois agentes, discutindo seus resultados.

Palavras-chave: Distorções harmônicas. Compartilhamento de responsabilidades. Ponto de Acoplamento Comum. Chaveamento de capacitores.

ABSTRACT

Among the disturbances that can affect the power quality, there are harmonic distortions. This situation, which is known to produce unwanted effects, such as wiring overheating, caused by the skin effect, erroneous actuation of the protection system, changes in the peak value, resonance, vibrations, increase of voltage drop and exasperation of neutral-earth voltage. There are no big issues in the measurement of these effects since it is possible to measure not only these parameters but also to indicate a possible flow of their predominance when measuring at a common coupling point between a particular consumer and the utility. However, despite several publications concerning the subject, there is still no method that can be considered assertive in the segregation of responsibility percentage for each harmonic distortion found. Nevertheless, the increasingly prominent need for a clear technical and regulatory role, since it is possible to impute responsibility for the transfer of the sources of the disorder. This paper gives a general overview about main existing methodologies that have proposed to overcome the problem, making a comparison among them. Based on this, one of these, called method of capacitive unit switching, was selected for a laboratory environment experimental validation, since the scope of the reference was limited to the computational simulations scope. The arrangement is developed using equipment and devices commonly found in industrial facilities, since a practical application for one of the premises for the method selection. With an application of the proposed equation, it becomes possible obtain the harmonic impedance of the load, thus allowing possible the application of the superposition theorem, in the same way proposed by reference paper. As results, reproduce in a laboratory environment an arrangement similar to the computational simulation, detailing the criteria and characteristics for the elaboration of the same, demonstrating the feasibility of such proposal. It corroborates the premises established by the reference method, through indicators and comparative data, and finally presents a viability of application of the method in determining the proportions of responsibility for a case of harmonic distortion involving two agents, discussing their results.

Key-words: Harmonic distortions. Sharing responsibility. Point of Common Coupling. Capacitor unit switching.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MEIO-CICLO DE CORRENTE DETURPADO PELA PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE QUINTA ORDEM	14
FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS PURAMENTE RESISTIVOS	19
FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS ARMAZENADORES DE ENERGIA LINEARES	19
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS NÃO LINEARES.....	20
FIGURA 5 – INTERPRETAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA CONFORME O ENQUADRAMENTO DOS FASORES.....	25
FIGURA 6 – CIRCUITO PROPOSTO PELO MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME	27
FIGURA 7 – CIRCUITO EQUIVALENTE DAS CARGAS CONECTADAS A UM PAC	28
FIGURA 8 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE NORTON PARA UMA DADA ORDEM HARMÔNICA h	28
FIGURA 9 – CIRCUITOS EQUIVALENTES DE NORTON PARA UMA DADA ORDEM HARMÔNICA h SOB PONTO DE VISTA DO (a) SUPRIDOR e (b) CONSUMIDOR.	30
FIGURA 10 – PROJEÇÕES DOS FASORES DE CORRENTE	31
FIGURA 11 – PROJEÇÕES DOS FASORES DE TENSÃO	33
FIGURA 12 – ARRANJO FÍSICO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO	34
FIGURA 13 – APLICAÇÃO DO CONCEITO DE SUPERPOSIÇÃO DOS EFEITOS APÓS INSERÇÃO DO FILTRO HARMÔNICO SOB PONTO DE VISTA DO (a) SUPRIDOR e (b) CONSUMIDOR	35
FIGURA 14 – DIAGRAMAS SIMPLIFICADOS DE UM PAC ENTRE CONCESSÁRIA E CONSUMIDOR, COM INSTALAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES NO (a) PRIMÁRIO E (b) SECUNDÁRIO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	37
FIGURA 15 – ARRANJO ELÉTRICO REPRESENTATIVO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CAPACITIVO E SUAS DUAS CONDIÇÕES OPERATIVAS: (a)	

BANCO DE CAPACITORES CONECTADO AO PAC e (b) BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO	38
FIGURA 16 – ARRANJO LABORATORIAL PROPOSTO PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO DE CAPACITORES.	47
FIGURA 17 – FONTE UTILIZADA NOS ENSAIOS.....	49
FIGURA 18 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZADO COMO IMPEDÂNCIA DA FONTE.	50
FIGURA 19 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO EM SÉRIE DO BANCO DE RESISTÊNCIAS DE 3x10 kW.	50
FIGURA 20 – DETALHE DA PONTE RETIFICADORA E DO CAPACITOR ELETROLÍTICO UTILIZADO NA CARGA.	51
FIGURA 21 – FORMA DE CONEXÃO DOS CAPACITORES PARA FORMAÇÃO DO BANCO	51
FIGURA 22 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO DE SUPRIMENTO DISTORCIDA PELA INJEÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS ORIUNDAS DA PARCELA NÃO LINEAR DA CARGA.....	53
FIGURA 23 – DIAGRAMA DE LIGAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADOR.....	55
FIGURA 24 – DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE TOTAL NO PAC EM COMPONENTES QUE (a) SE SOMAM (b) SE SUBTRAEM.....	59
FIGURA 25 – PAINEL DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS UTILIZADA NO ENSAIO DE CONFRONTAMENTO	73

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO ($I_{pac} - h$)	63
GRÁFICO 2 – ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO ($I'_{pac} - h$).....	63
GRÁFICO 3 – ESPECTRO HARMÔNICO DA TENSÃO DA FONTE À VAZIO	64
GRÁFICO 4 – ESPECTRO HARMÔNICO DA TENSÃO DA FONTE ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS À VAZIO	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS ESTUDADOS.....	44
QUADRO 2 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO	61
QUADRO 3 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO.....	61
QUADRO 4 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE ANTES E APÓS A INSERÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES.....	62
QUADRO 5 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO	62
QUADRO 6 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO	62
QUADRO 7 – VALORES DAS TENSÕES DE FASE VERIFICADAS DURANTE O MONITORAMENTO DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE CARGA.....	64
QUADRO 8 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO SUPRIDOR OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES ORIUNDOS DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO À MONTANTE DO PAC.....	65
QUADRO 9 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS APÓS A CONVERSÃO DAS TENSÕES DE THÉVENIN EM CORRENTES DE NORTON.....	66
QUADRO 10 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	66
QUADRO 11 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTEDO SUPRIDOS ONTIDOS POR MÉTODOS DISTINTOS	67
QUADRO 12 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	68
QUADRO 13 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS EQUIVALENTE DO CONSUMIDOR	68
QUADRO 14 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS TOTAIS DO CONSUMIDOR	69

QUADRO 15 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR	69
QUADRO 16 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR	69
QUADRO 17 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS TOTAIS NO PAC OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA LEI DE KIRCHOFF DOS NÓS	70
QUADRO 18 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC	71
QUADRO 19 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC	71
QUADRO 20 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC	71
QUADRO 21 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC COM FONTE ISENTA DE DISTORÇÃO	74
QUADRO 22 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO	81
QUADRO 23 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO	82
QUADRO 24 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE ANTES E APÓS A INSERÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES	83
QUADRO 25 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO	84
QUADRO 26 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO	85
QUADRO 27 – VALORES DAS TENSÕES DE FASE VERIFICADAS DURANTE O MONITORAMENTO DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE CARGA	86
QUADRO 28 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO SUPRIDOR OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES ORIUNDOS DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO À MONTANTE DO PAC	87
QUADRO 29 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS APÓS A CONVERSÃO DAS TENSÕES DE THÉVENIN EM CORRENTES DE NORTON	88

QUADRO 30 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	89
QUADRO 31 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE OBTIDOS POR MÉTODOS DISTINTOS	90
QUADRO 32 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS.....	91
QUADRO 33 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DA CARGA SUPRIDA PELO CIRCUITO RETIFICADOR	92
QUADRO 34 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS TOTAIS DA CARGA	93
QUADRO 35 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR.....	94
QUADRO 36 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR.....	95
QUADRO 37 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS TOTAIS NO PAC OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA LEI DE KIRCHOFF DOS NÓS	96
QUADRO 38 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC	97
QUADRO 39 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC	98
QUADRO 40 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC	99
QUADRO 41 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC COM FONTE DE TENSÃO ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS NO ARRANJO LABORATORIAL	48
TABELA 2 – VALORES OBTIDOS POR FASE NO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NO ARRANJO LABORATORIAL	55
TABELA 3 – VALORES DAS GRANDEZAS CALCULADAS PARA O TRANSFORMADOR	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CC	Corrente Contínua
DII_h	Distorção harmônica individual de corrente de ordem h
DIT_h	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DTI	Distorção harmônica total de corrente
DTT	Distorção harmônica total de tensão
EN	<i>European Standards</i>
EMPA	Erro Médio Percentual Absoluto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.4	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DESTA DISSERTAÇÃO.....	17
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	18
2.2	MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA.....	22
2.3	MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME	25
2.4	MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO DOS EFEITOS	28
2.4.1	Método da superposição de correntes.....	30
2.4.2	Método da superposição de tensões	32
2.4.3	Limitações do método da superposição dos efeitos	33
2.5	MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO.....	33
2.6	MÉTODO DO CHAVEAMENTO CAPACITIVO	36
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	MATERIAIS	46
3.2	MÉTODOS	52
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60
4.1	VERIFICAÇÃO DAS PREMISSAS DO MÉTODO	60
4.2	VERIFICAÇÃO DO PADRÃO INTRINSECO DA FONTE DE TENSÃO	64
4.3	OBTENÇÃO DOS VALORES DE IMPEDÂNCIA DO SUPRIDOR	65
4.4	OBTENÇÃO DOS VALORES DAS CORRENTES DO CONSUMIDOR.....	67
4.5	OBTENÇÃO DOS VALORES DAS IMPEDÂNCIAS DO CONSUMIDOR.....	68
4.6	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO.....	69
4.7	PROJEÇÕES DOS FASORES DE CORRENTE.....	70
4.8	CONFRONTAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS	72
5	CONCLUSÕES	76
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	78

APÊNDICE A – QUADROS DE GRANDEZAS MEDIDAS E CALCULADAS ATÉ 30ª	
ORDEM HARMÔNICA.....	81

1 INTRODUÇÃO

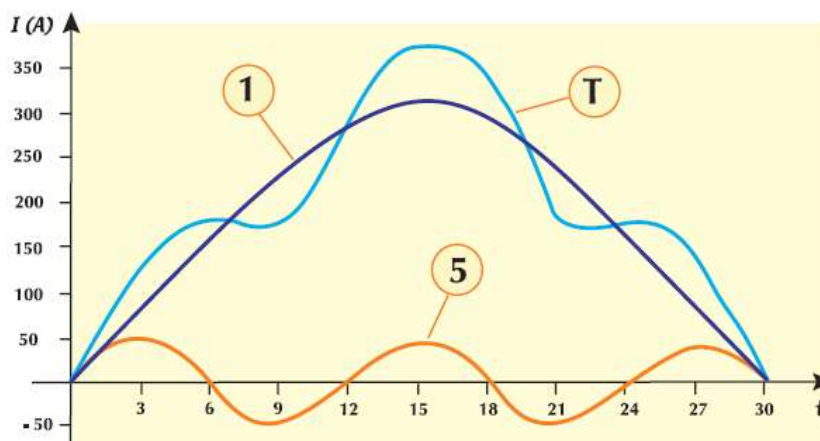
1.1 CONTEXTO

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 inicialmente senoidal, 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, aumentam as chances de casamento de impedâncias harmônicas que se anulam, propiciando a verificação de ressonâncias, que por sua vez, ocasionam elevados patamares de tensão e/ou corrente, interferência eletromagnética e/ou nos sistemas de comunicação industriais, devido às altas frequências atingíveis, dentre outros (DUGAN *et al.*, 2012). Um exemplo do efeito da presença destas senoides múltiplas se somando à fundamental pode ser visualizado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – MEIO-CICLO DE CORRENTE DETURPADO PELA PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE QUINTA ORDEM



FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE (2001).

Os indicadores de qualidade podem ser segmentados em dois grandes grupos: qualidade do serviço e qualidade do produto. O primeiro, que avalia, em síntese, as durações e frequências das interrupções no fornecimento de energia elétrica, já possui vasto arcabouço regulatório estabelecido no país. A qualidade do produto, que está relacionada à ausência de perturbações na forma de onda, por outro lado, ainda possui um regulamento incipiente, ao menos no âmbito nacional.

No que diz respeito à normatização atinente ao tema, destacam-se os nacionais Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015) e o submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2011). Já no âmbito internacional, notabilizam-se a IEC 61000-3-6 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2008), a IEEE Std 519-2014 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014) no cenário norte-americano e a EN 50160 (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION, 2010) no âmbito europeu.

Todavia, apesar da existência de tais documentos normativos, o teor dos mesmos se restringe à proposta de valores de referência, visando manter a qualidade do produto em patamares aceitáveis, sem explorar o mérito da responsabilidade de nexos causais. Isto significa que, uma vez detectado o fenômeno, identificar o causador do distúrbio, baseado no percentual de contribuição da

distorção harmônica mensurada num ponto comum, ainda se demonstra um desafio a ser suplantado.

1.2 JUSTIFICATIVA

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 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2014).

A ausência de um regulamento que aborde este tema se explica pela lacuna técnica presente na academia, tornando-se um empecilho para que as obrigatoriedades na regularização das anomalias uma vez constatadas sejam devidamente imputadas ao(s) agente(s) causador(es).

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 (SRINIVASAN e JUTRAS, 1998) e a utilização do teorema da superposição dos efeitos (XU; LIU, 2000), cujas fragilidades já foram refutadas por outros autores, tais como (COSTA, 2009) e (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Diante deste cenário, através do constante processo de busca por metodologias que consigam suplantam esta lacuna, deve-se mencionar o método da superposição modificado (SANTOS, 2011), e ainda, no método do chaveamento capacitivo, cuja autoria é de SANTOS (2015). 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.

Não obstante, 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.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho visa validar, através de ensaios laboratoriais, a metodologia denominada método do chaveamento capacitivo, no afã de determinar o percentual de responsabilidade perante uma constatação de distorção harmônica verificada num ponto de acoplamento comum, possibilitando que seja possível proporcionalizar as ações mitigadoras imputadas cada agente envolvido.

Para atingir tal ponto, os seguintes objetivos específicos deverão ser cumpridos:

- analisar de forma crítica as metodologias propostas na literatura existente, identificando seus fundamentos, virtudes e inconsistências;
- definir método objeto de estudo para validação prática;
- propor um arranjo laboratorial coerente com o método selecionado;
- validar sua correspondência ao mesmo;
- realizar ensaios laboratoriais analisando o desempenho do método proposto;
- realizar ajustes, caso necessário, para possibilitar melhor reprodutibilidade.

1.4 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DESTA DISSERTAÇÃO

Com vistas à contextualização propiciada pelo capítulo introdutório, aliado à definição dos objetivos, identificam-se os seguintes pontos de contribuição científica no presente trabalho:

- Determinação da viabilidade de reprodução física de um método testado singularmente em ambiente computacional;
- Validação da coerência do equacionamento proposto pelo método utilizado como base;
- Elencar principais entraves práticos para utilização do método numa instalação real.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo introdutório, que tem por intuito contextualizar o tema, apresentar as justificativas e objetivos, esta dissertação é composta de outros quatro capítulos.

O segundo capítulo aborda as origens das distorções harmônicas e os trabalhos que se esmeraram em determinar um método para a determinação do compartilhamento de responsabilidade, findando pela seleção de um método para reprodução laboratorial.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para reprodução física do modelo proposto, detalhando seu arranjo e sequência de etapas.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos, avaliando sua coerência com o método teórico e motivos para eventuais destoâncias.

O quinto e último capítulo abarca as considerações conclusivas sobre o trabalho, com o intuito de sintetizar as suas principais contribuições, além de sugerir possíveis linhas de pesquisa correlatadas que carecem de investigações futuras mais aprofundadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a contextualização efetuada no capítulo introdutório, o ponto nevrálgico proposto por este trabalho já é, notoriamente, objeto de estudos no meio científico, sendo que diversas publicações, cada qual com uma linha de investigação específica, se esforçaram para suplantar a problemática de segregação de responsabilidades quando da constatação de distorções harmônicas num Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que nada mais é que a fronteira elétrica onde a montante se encontra a rede de distribuição, de responsabilidade da distribuidora de energia elétrica, e a jusante, a instalação consumidora. Porém, como os resultados ainda são insatisfatórios, torna-se pertinente a continuidade desta linha de pesquisa.

Sobretudo é de extrema pertinência reconhecer que o conhecimento produzido por tais referências são de extrema relevância para o tema, sobretudo por nortear e permitirem a identificação de seus pontos fortes e eventuais fragilidades, instigando novas soluções a estas últimas.

Destarte, o presente capítulo tem o intuito trazer à luz princípios básicos acerca do tema distorções harmônicas para logo em seguida apresentar os principais métodos encontrados na literatura para os fins aqui discutidos, sendo que são feitos apontamentos no que diz respeito aos seus princípios físicos e formulações matemáticas. Neste âmbito, são explorados os procedimentos conhecidos como: Fluxo de Potência Harmônica, Corrente Conforme e Não-Conforme, Superposição dos Efeitos, Superposição Modificado e Chaveamento Capacitivo.

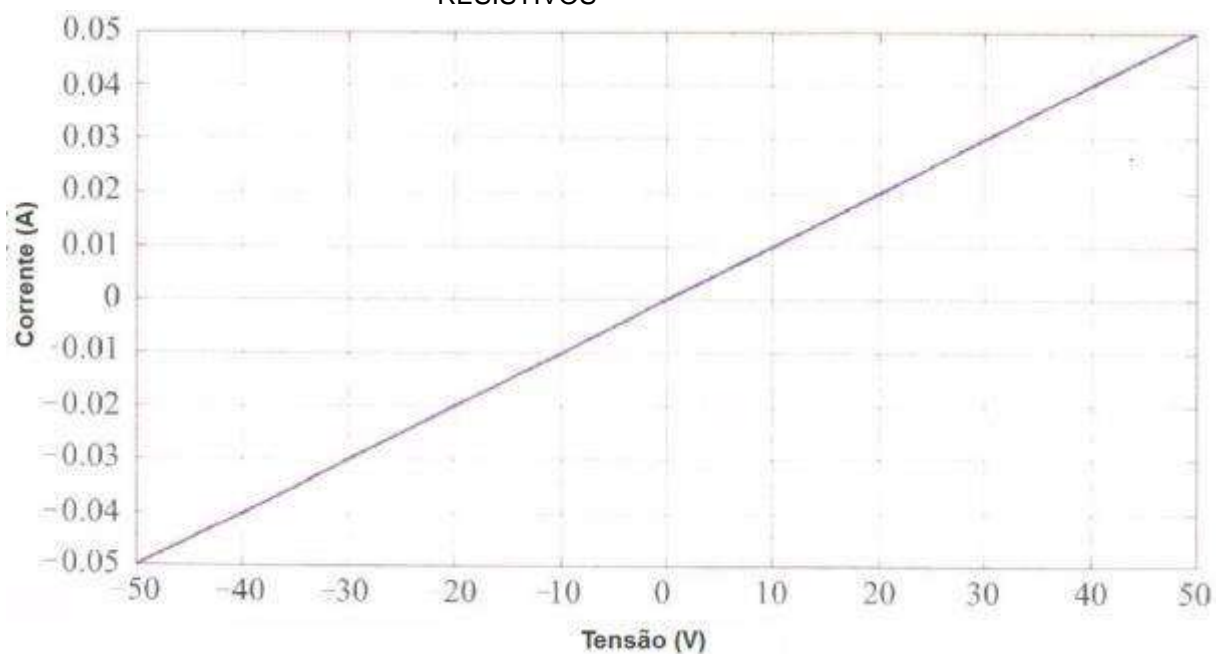
2.1 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Para correto entendimento do surgimento das distorções harmônicas no sistema elétrico, faz-se mister introduzir o conceito de cargas lineares e não-lineares.

Os dispositivos ditos lineares drenam uma corrente elétrica proporcional à tensão de alimentação. Esta condição se verifica tanto para situações puramente resistivas, ilustradas por meio da FIGURA 2, onde se identifica uma relação geométrica dada por uma reta, quanto para elementos armazenadores de energia (capacitivos ou indutores), contemplados pela FIGURA 3, onde uma relação traduzida geometricamente por meio de uma elipse. Ambas as condições são

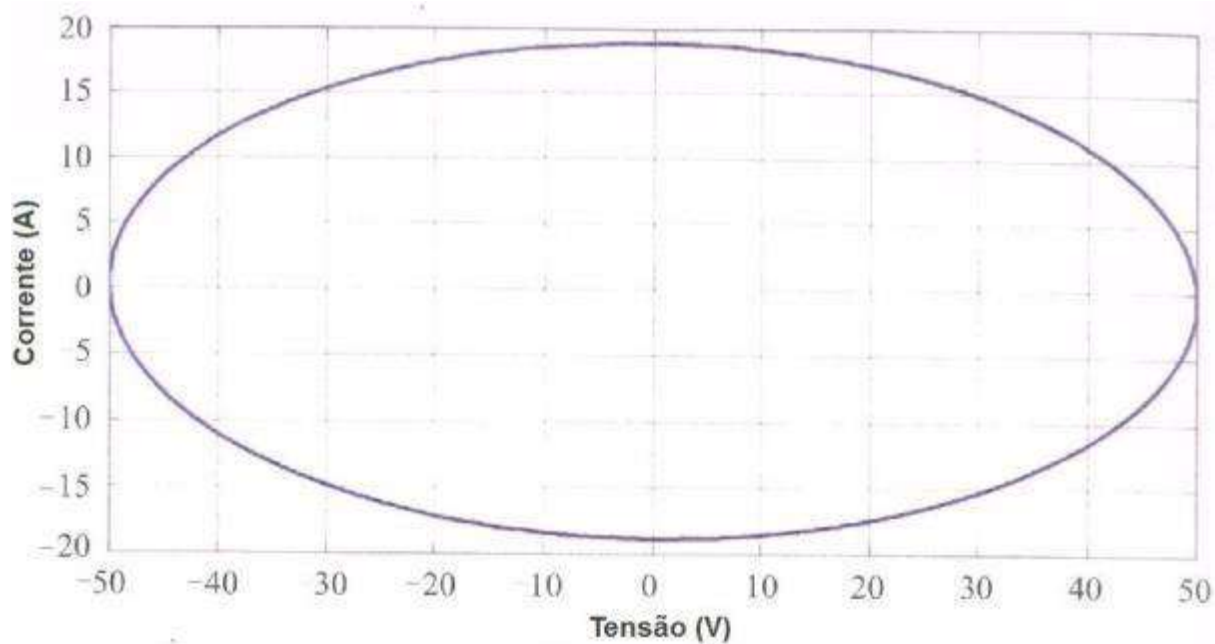
explicadas pela lei de Ohm, que descreve o comportamento linear de dispositivos que apresentam uma relação proporcional entre tensão e corrente.

FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS PURAMENTE RESISTIVOS



FONTE: adaptado de BARCÓN *et al.* (2012).

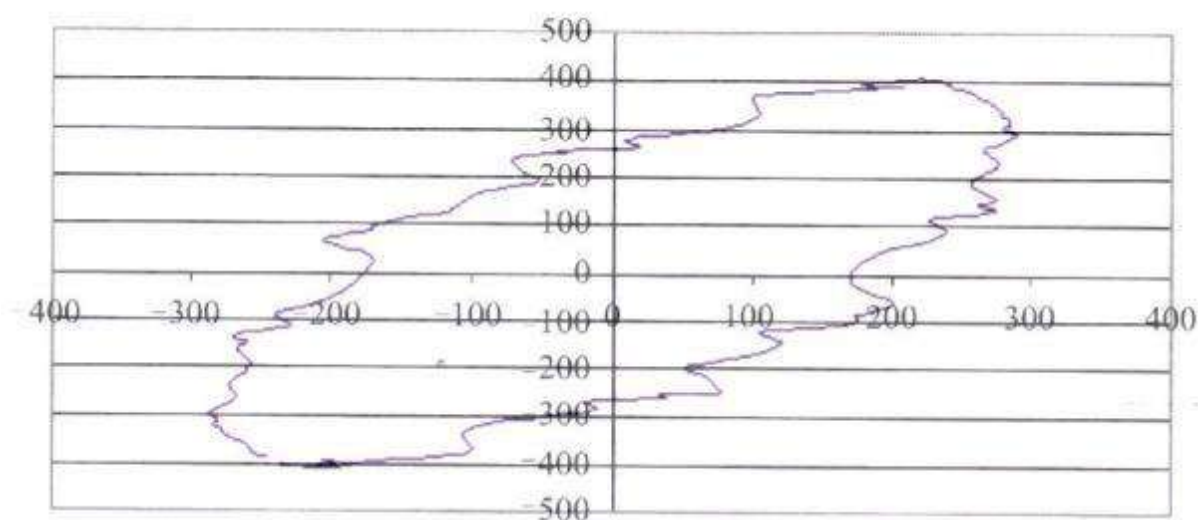
FIGURA 3 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS ARMAZENADORES DE ENERGIA LINEARES



FONTE: adaptado de BARCÓN *et al.* (2012).

Por sua vez, os dispositivos não lineares demandam uma corrente elétrica sem relação proporcional à tensão de suprimento, o que acarreta no fato de que a relação entre tensão e corrente possua características não triviais, conforme aquelas verificadas nos equipamentos lineares, cuja relação geométrica pode ser representada por retas ou elipses. Esta situação diferenciada é demonstrada na FIGURA 4:

FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE EM ELEMENTOS NÃO LINEARES



FONTE: BARCÓN *et al.*(2012).

Estes dispositivos podem ainda ser subdivididos em convencionais e chaveados, sendo os primeiros caracterizados pela presença de componente lineares e não lineares. Exemplos deste tipo convencional são equipamentos saturáveis, como transformadores, reatores de núcleo ferromagnético e afins. O segundo grupo, é caracterizado pela presença de interruptores estáticos, controlados ou não controlados, podendo ser caracterizados como fontes de tensão ou correntes harmônicas, que representam as injeções de distorções harmônicas impostas aos demais componentes do sistema ao qual se encontram conectadas (ANTUNES *et al.*, 2014).

A presença destas componentes, múltiplas da frequência fundamental, se tornam extremamente nocivas ao restante do sistema, uma vez que devido ao efeito pelicular (fenômeno que faz com que a repulsão entre as cargas elétricas aumente, criando uma maior tendência de fluxo nas áreas periféricas de um condutor) contribuem para a sobrecarga em cabos e condutores ocasionando

sobreaquecimento. Não obstante, em situação de presença de altas ordens harmônicas, o fenômeno pode produzir interferência nos sistemas industriais de comunicação.

No que tange às proteções do sistema, estas podem vivenciar atuações inapropriadas, seja porque no do projeto levou-se em consideração apenas o valor da corrente fundamental, ou ainda, pelo fato de alguns dispositivos não utilizarem o valor *Root Mean Square* (RMS) verdadeiro, incorrendo em erro devido ao incremento no fator de crista da corrente, sensibilizando assim, dispositivos termomagnéticos e/ou diferenciais.

Contudo, um dos efeitos mais danosos que as distorções harmônicas podem ocasionar é o efeito da ressonância série ou paralela. Em síntese, o acoplamento de uma reatância capacitiva com uma reatância indutiva pode produzir valores extremamente altos (série) ou baixos (paralelo) de impedâncias, acarretando em elevadas sobretensões capazes de romper os dielétricos dos equipamentos submetidos a estas, ocasionando explosões.

As principais tipologias de cargas não-lineares mais comumente encontradas são os retificadores carregadores, variadores de velocidade, fontes de alimentação monofásicas (presentes em quase todos os eletroeletrônicos), além de máquinas de solda (INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

No que concerne à forma de mensuração das distorções harmônicas, estas podem ser subdividas em harmônicas de tensão ou de corrente. Os principais indicadores alusivos ao tema ainda se subdividem em individuais, que visam mensurar a representatividade de uma ordem harmônica específica perante o valor da grandeza fundamental, ou totais, que se dedicam a propiciar uma avaliação do mesmo quociente, desta vez levando em consideração somatória de toda as ordens harmônicas de interesse.

As equações enumeradas de 1 a 4 apresentam a forma de cômputo dos principais indicadores atinentes ao tema:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$DTT_h \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

$$DII_h \% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (3)$$

$$DTI_h \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (4)$$

FONTE: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016.

Onde:

h = ordem harmônica individual;

V_h = Tensão harmônica de ordem h ;

V_1 = Tensão fundamental;

DIT_h = Distorção harmônica individual de tensão para ordem h ;

DTT_h = Distorção harmônica total de tensão;

I_h = Corrente harmônica de ordem h ;

I_1 = Corrente fundamental;

DII_h = Distorção harmônica individual de corrente para ordem h ;

DIT_h = Distorção harmônica total de corrente.

Por meio da observação às equações é possível inferir que os patamares das distorções de tensão, via de regra, possuem valores percentualmente baixos, na ordem de 10%. Isto se deve ao fato do denominador da equação para cômputo das distorções de tensão ser a tensão nominal do barramento a qual se está realizando a análise, valor este sempre fixo. Já no que concerne às distorções de corrente, o denominador das equações são valores bastante variáveis, o que acarreta num quociente maior, não raramente próximo ou superior a 1, cujo significado pode ser traduzido como presença de correntes harmônicas próximas ou superiores à fundamental.

2.2 MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA

A proposta do método do Fluxo de Potência Harmônica, faz uso de clássicos métodos matemáticos destinados à identificação da direcionalidade do fluxo de harmônicos em sistemas elétricos para definição das fontes predominantes de distorções. Isto significa, portanto, que o método não se compromete a quantificar a contribuição dos agentes envolvidos, o que implica no fato de que por mais que seja

apontada uma predominância deste ou daquele agente, não é possível identificar a real proporção desta. Dentre os autores que se propuseram a utilizar este conceito para estabelecer o ente dominante estão AKAGI e TANAKI (1995), CRISTALDI e FERRERO (1995), CASE *et al.* (1996), BARROS *et al.* (2003), AZOUAOU *et al.* (2004) e LIN *et al.* (2005).

O embasamento da técnica se dá a partir da obtenção das magnitudes e ângulos da tensão e corrente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) de interesse e, por meio de medições ou simulações computacionais, decompô-las por meio da série de Fourier tornando possível encontrar as componentes harmônicas individuais desses sinais (ARRILLAGA e WATSON, 2003). Por meio da equação (5) torna-se possível obter a potência ativa total no PAC:

$$P = P_1 + P_h = V_{pac-1} \cdot I_{pac-1} \cdot \cos \phi_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_{pac-h} \cdot I_{pac-h} \cdot \cos \phi_h \quad (5)$$

FONTE: SANTOS, 2015.

Onde:

P = potência ativa total de fase no PAC;

P_1 = parcela da potência ativa total referente à frequência fundamental;

P_h = parcela da potência ativa total referente às frequências harmônicas;

V_{pac-1} = módulo da tensão de fase eficaz de frequência fundamental no PAC;

I_{pac-1} = módulo da corrente eficaz de fase de frequência fundamental no PAC;

ϕ_1 = defasagem angular entre a tensão e a corrente fundamental no PAC;

V_{pac-h} = módulo da tensão de fase eficaz de frequência harmônica h no PAC;

I_{pac-h} = módulo da corrente eficaz de fase de frequência harmônica h no PAC;

ϕ_h = defasagem angular entre a tensão e a corrente de frequência harmônica h no PAC.

Por meio de convenção de sentidos, adota-se como positivo o sentido do fluxo da potência ativa de frequência fundamental. Na sequência, verifica-se em qual quadrante se localiza o ângulo ϕ_h , obtendo-se assim o sinal da potência harmônica, cujo responsável terá sinal aderente ao anteriormente convencionado, seja este positivo ou negativo. Em síntese, caso assuma-se como positivo o fluxo no sentido do supridor para o consumidor, tem-se que:

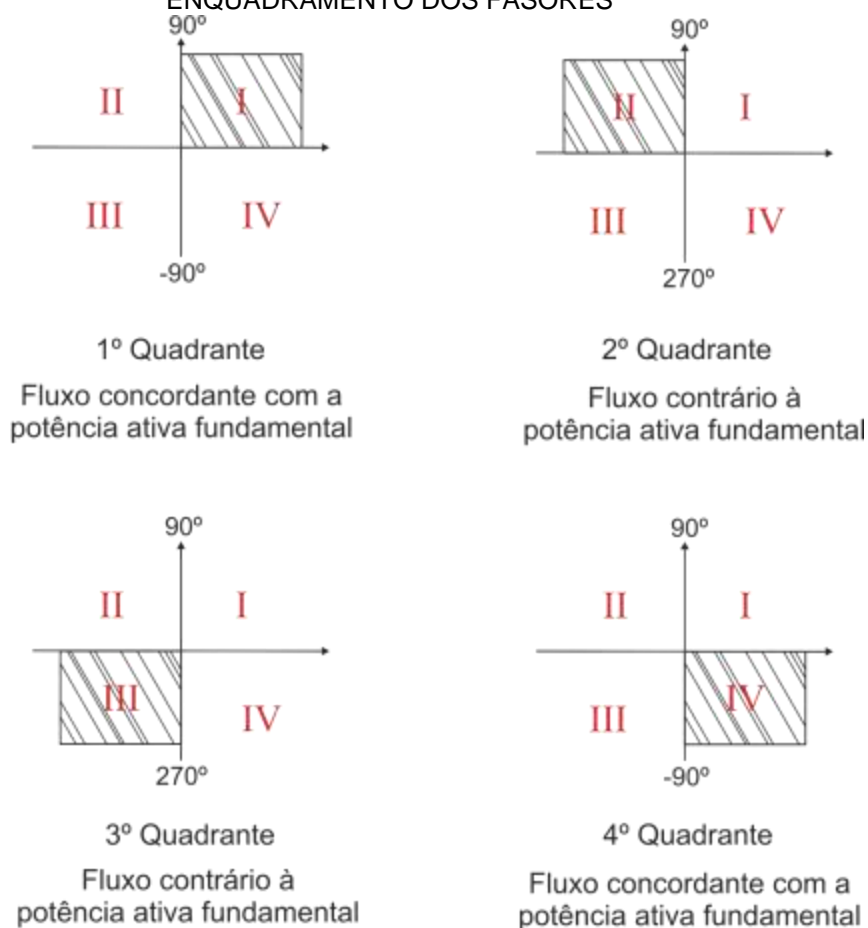
- $-90^\circ < \phi_h < 90^\circ$: neste caso, a potência harmônica ativa possui sinal positivo (concordante ao sinal da potência ativa fundamental) e, assim, o supridor atua como gerador predominante da ordem harmônica em questão;
- $90^\circ < \phi_h < 270^\circ$: neste caso, a potência harmônica ativa apresenta sinal negativo (oposto ao sinal da potência ativa fundamental) e, dessa forma, o consumidor atua como principal causador das distorções da ordem harmônica sob análise.

A FIGURA 5 sintetiza as possibilidades e enquadramentos possíveis para cada ordem harmônica.

Segundo diversos autores que já realizaram investigações acerca da eficácia do método do fluxo de potência harmônica, dentre os quais, se destacam AKAGI e TANAKI (1995), XU *et al.* (2003), OLIVEIRA *et al.*, 2011, SANTOS (2007 e 2011), existem pontos desfavoráveis à aplicação prática do método, que passam pela necessidade de se utilizar um medidor que seja capaz de calcular a série de Fourier, colocam em xeque a precisão da resposta quando há baixos níveis de distorções harmônicas, além de ressaltar que os erros advindos dos equipamentos de medição podem influenciar sobremaneira os resultados da aplicação da metodologia, principalmente quando o ângulo ϕ_h apresenta valores limítrofes a 90° ou -90° , dentre outros motivos.

Destarte, apesar de se tratar de um método relativamente difundido e aplicável em determinadas circunstâncias, as fragilidades constatadas demonstram sua inviabilidade de utilização para a problemática aqui proposta.

FIGURA 5 – INTERPRETAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA CONFORME O ENQUADRAMENTO DOS FASORES



FONTE: o autor (2016).

2.3 MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME

Proposto por SRINIVASAN e JUTRAS (1998), o método da Corrente Conforme e Não conforme sugere a segregação da corrente no PAC, em duas parcelas, denominadas conforme e não conforme, cada qual com as características intrínsecas às cargas que alimentam.

Com base nesta premissa, a metodologia assume que as instalações consumidoras, à jusante do PAC, podem conter elementos passíveis de enquadramento em dois grupos antagônicos:

- Grupo 1 – conforme: cargas que não produzem distorções adicionais àquelas já presentes na tensão de suprimento;
- Grupo 2 – não conforme: cargas que produzem distorções adicionais àquelas originalmente presentes na tensão de suprimento.

Este último grupo pode ainda ser subdividido em três outras categorias, de acordo com seu comportamento perante o circuito a qual se encontra conectada:

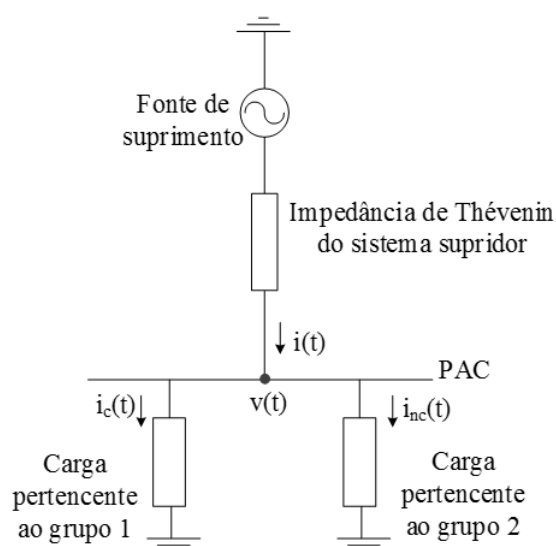
- Desejáveis - quando atenuam os níveis de distorções originalmente presentes na rede;
- Indesejáveis - quando intensificam os níveis de distorções a priori constatados no suprimento;
- Geradoras de distorção - quando produzem uma corrente distorcida, mesmo perante tensão de suprimento original puramente senoidal.

Face ao contexto, a FIGURA 6 exhibe um circuito que sintetiza a metodologia, exibindo uma fonte de suprimento em série com uma impedância, a qual define o nível de curto-circuito da rede e uma instalação consumidora contendo elementos enquadrados nos grupos 1 e 2. De igual maneira ao preconizado, no ramo da carga pertencente ao grupo 1 circula a parcela de corrente dita conforme, enquanto o ramo pertencente ao grupo 2 está atrelado à parcela de corrente denominada não conforme.

Partindo do pressuposto que a relação entre qualquer tensão harmônica e sua respectiva corrente resulta numa impedância constante, e ainda, que na frequência fundamental o valor da parcela dita conforme equivale à corrente total, procede-se equacionamento matemático que determina a forma de obtenção da parcela de corrente dita conforme. Posteriormente, por meio da aplicação da lei de Kirchoff dos nós, a parcela da corrente dita não conforme é extraída por meio da subtração da corrente total e a parcela conforme, encontrada conforme descrito. Isto

posto, a atribuição do percentual de responsabilidades poderia ser definida fazendo uso da proporção das correntes de cada tipologia (conforme e não-conforme) para cada espectro de frequência.

FIGURA 6 – CIRCUITO PROPOSTO PELO MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO-CONFORME



FONTE: SANTOS (2015).

Onde:

$v(t)$ – tensão instantânea presente no PAC;

$i(t)$ – corrente instantânea total presente no PAC;

$i_c(t)$ – parcela da corrente dita conforme, a qual supre as cargas do grupo 1;

$i_{nc}(t)$ – parcela da corrente chamada não conforme, a qual supre as cargas do grupo 2.

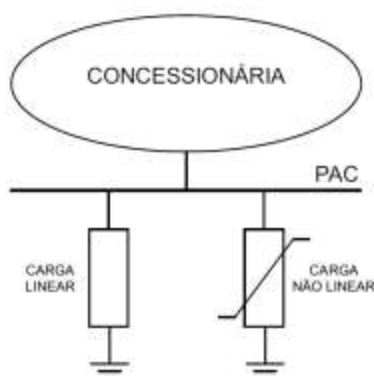
Todavia, resta frisar que a assunção de que as cargas possuem impedância constante para toda e qualquer frequência se configura como premissa assaz questionável no âmbito da tratativa de circuitos elétricos, motivos pelos quais, outros autores como SANTOS (2007) e OLIVEIRA *et al.* (2014) já refutaram sua aplicabilidade.

2.4 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO DOS EFEITOS

De modo a introduzir o conceito do método, visualiza-se por meio da FIGURA 7 a topologia simplificada atrelada a um PAC, onde à montante se encontra a distribuidora (que sintetiza todo o sistema elétrico à montante desta) e à jusante a unidade consumidora e suas instalações elétricas internas.

A modelagem do circuito apresentado pode ser convertida para seu equivalente de Norton. Também se aplicam técnicas de modelagem no domínio da frequência, visando representar todos os circuitos correspondentes às ordens harmônicas presentes na análise. Este arranjo típico se encontra representado na FIGURA 8.

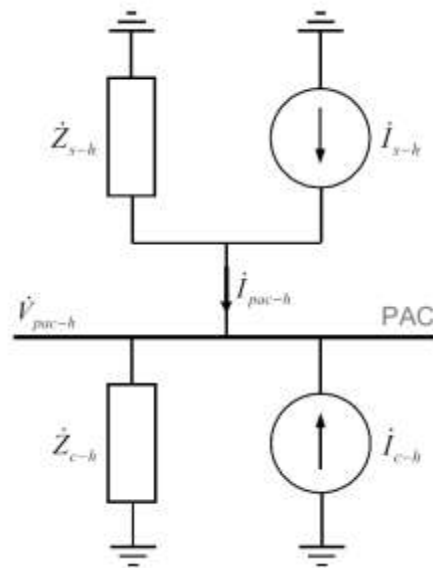
FIGURA 7 – CIRCUITO EQUIVALENTE DAS CARGAS CONECTADAS A UM PAC



FONTE: SANTOS (2011).

:

FIGURA 8 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE NORTON PARA UMA DADA ORDEM HARMÔNICA h



FONTE: SANTOS (2011).

Onde, para cada ordem harmônica h , tem-se:

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 medida no ponto de acoplamento;

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

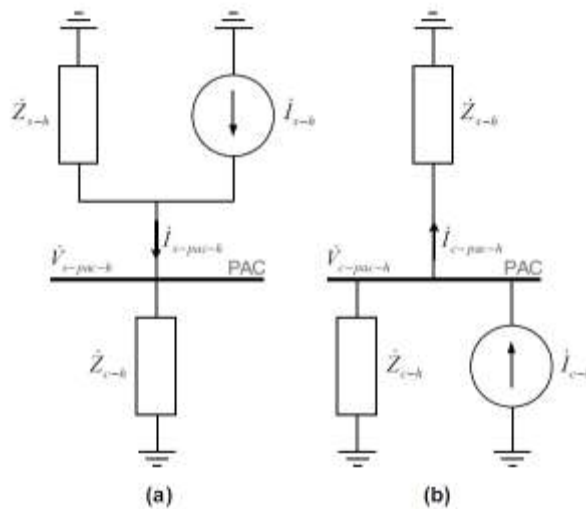
O princípio do método da superposição dos efeitos se baseia na propriedade aditiva das funções lineares. Isto significa que dado um circuito com n fontes de corrente ou tensão, desde que independentes, um dado valor de uma grandeza presente no circuito é resultado das contribuições independentes de cada fonte isoladamente, sem que as demais estejam presentes no circuito. Em síntese, analisa-se uma única fonte de tensão ou corrente e eliminam-se as demais (substituindo fontes de tensão por um curto-circuito e fontes de corrente por um circuito aberto), calculando, então, a grandeza desejada. Repete-se o processo com cada fonte independente de tensão ou corrente e, ao final, somam-se os valores encontrados para cada uma das etapas. As contribuições de cada fonte numa

determinada grandeza resultante podem ser obtidas pela projeção fasorial de cada parcela sobre o fasor total.

As FIGURAS 9 (a) e (b) apresentam situações que se aplicam à problemática do PAC, onde cada agente é representado por fontes de corrente de forma parcial.

A técnica pode ser aplicada de forma dual tanto para tensão quanto para corrente.

FIGURA 9 – CIRCUITOS EQUIVALENTES DE NORTON PARA UMA DADA ORDEM HARMÔNICA h SOB PONTO DE VISTA DO (a) SUPRIDOR e (b) CONSUMIDOR.



FONTE: SANTOS (2011).

Onde:

$\dot{I}_{s-pac-h}$ 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}).

2.4.1 Método da superposição de correntes

As respectivas parcelas de contribuição do supridor e do consumidor na corrente harmônica total no PAC podem ser obtidas por meio da aplicação do conceito de divisor de correntes, propostas pelas equações (6) e (7), respectivamente:

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

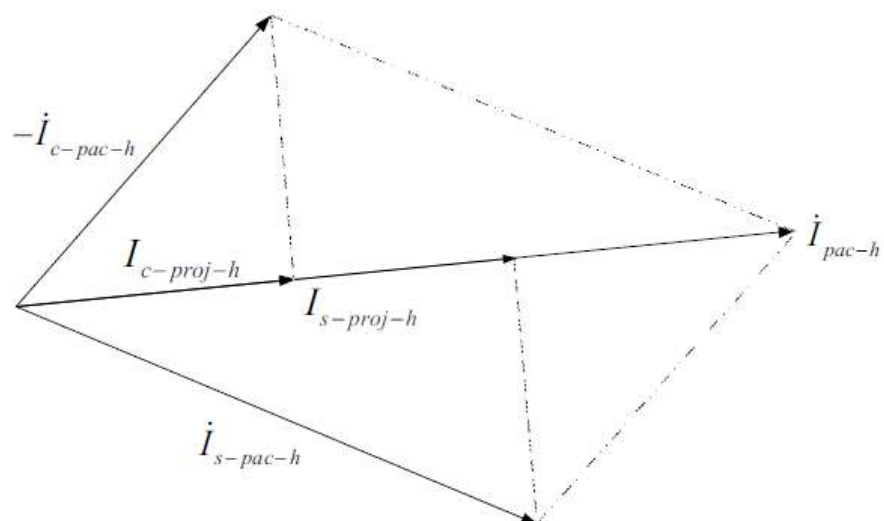
$$\dot{I}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (7)$$

Através da aplicação, finalmente, da superposição dos efeitos, isto, é, aplicando-se a Lei de Kirchoff das correntes no PAC, tem-se a corrente total, conforme demonstrado pela equação (8):

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

Por fim, a metodologia estabelece que o compartilhamento das responsabilidades entre as partes deve ser feito por meio das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais de corrente, sobre o fasor da corrente total verificada no PAC. As visualizações gráficas destas projeções podem ser obtidas por meio da FIGURA 10.

FIGURA 10 – PROJEÇÕES DOS FASORES DE CORRENTE



FONTE: SANTOS (2011).

Onde:

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

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

2.4.2 Método da superposição de tensões

De maneira análoga ao método da superposição das correntes, que se utiliza do circuito equivalente de Norton para definição do equacionamento, pode-se fazer uso do teorema de Thévenin e realizar o equacionamento dual, permitindo assim, a aplicação do método de superposição das tensões, conforme demonstrado pelas equações (9) e (10):

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (9)$$

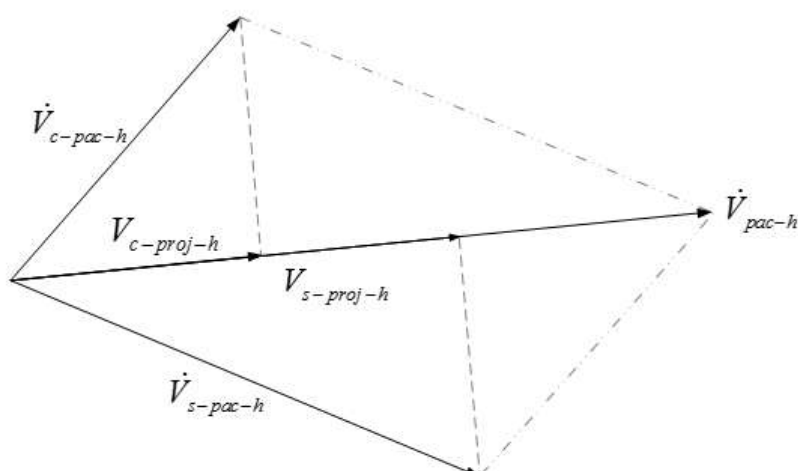
$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (10)$$

De igual maneira, a tensão harmônica total no PAC é formada a partir da soma fasorial das contribuições de cada um dos agentes, conforme indica a equação (11).

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{s-pac-h} + \dot{V}_{c-pac-h} \quad (11)$$

Novamente, para encontrar as parcelas de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, deve-se realizar a projeção das contribuições individuais ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre a tensão total no PAC (\dot{V}_{pac-h}). Para elucidar o procedimento, a FIGURA 11 exibe a decomposição da tensão no ponto de acoplamento em dois escalares obtidos das projeções.

FIGURA 11 – PROJEÇÕES DOS FASORES DE TENSÃO



FONTE: SANTOS (2011).

Onde:

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

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

2.4.3 Limitações do método da superposição dos efeitos

Muito embora se encontre fundamentado num sólido arcabouço matemático, a aplicação da desta metodologia tem como pré-requisito o conhecimento prévio das impedâncias harmônicas de ambos agentes vinculados ao PAC, o que por muitas vezes é impossível, especialmente no que diz respeito às instalações da unidade consumidora, principalmente pelo dinamismo do regime das cargas.

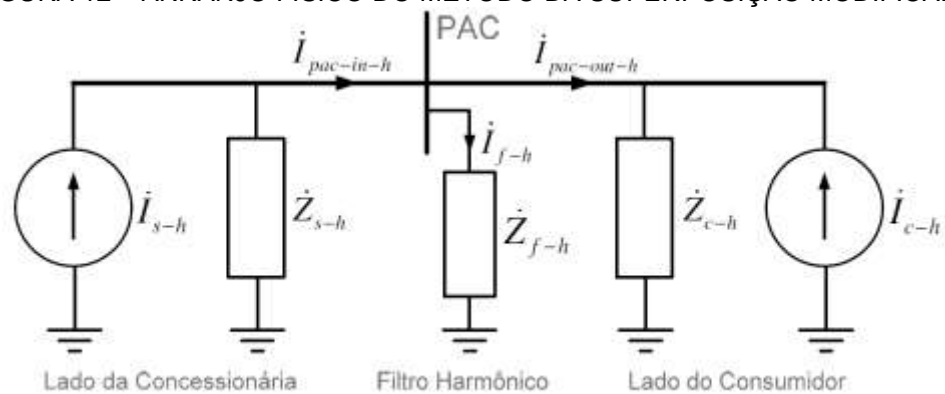
Estas dificuldades, como demonstrado em COSTA (2009), conduzem a resultados de compartilhamento que podem se apresentar com grandes discrepâncias numéricas e até mesmo inconsistentes com a realidade operacional do complexo sob investigação.

2.5 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

O método da Superposição Modificado, proposto por SANTOS (2011), se apresenta como sendo uma alternativa que visa, essencialmente, contornar as

limitações sofridas pelo método da superposição dos efeitos convencional, no que concerne à dificuldade de obtenção de dados referentes às impedâncias harmônicas dos circuitos elétricos analisados. A metodologia preconiza que este objetivo seja alcançado por meio da inserção de uma impedância harmônica dominante (em relação às impedâncias equivalentes do supridor e consumidor) junto ao PAC. Esta impedância pode ser representada por um componente passivo, tal como um filtro sintonizável na(s) frequência(s) compatíveis às componentes harmônicas de interesse, que apresente uma impedância harmônica conhecida, o que tornará possível a proporção das correntes harmônicas de ambos os agentes e, por fim, através do método da superposição convencional, a proporção da responsabilidade das partes envolvidas. A FIGURA 12 demonstra este complexo:

FIGURA 12 – ARRANJO FÍSICO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO



FONTE: SANTOS (2011).

Onde:

\dot{Z}_{f-h} – impedância harmônica equivalente do filtro inserido para ordem h ;

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

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

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

Se valendo da presunção que por se tratar de um filtro, a nova tensão harmônica no PAC não será afetada, uma vez que a impedância do mesmo tem valor predominante sobre as demais impedâncias do sistema em análise, a metodologia assume que quando da visualização dos efeitos das fontes de forma individual, as correntes que circularão pelo ramo do filtro harmônico são

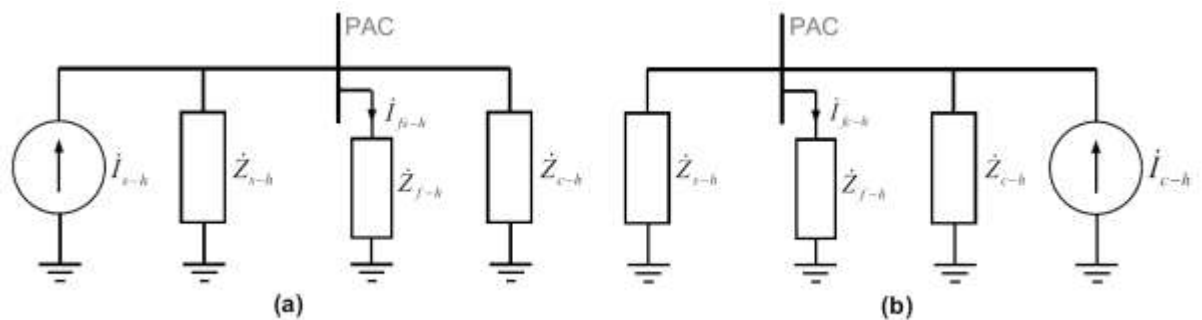
praticamente iguais às da fonte de corrente sob análise, resultado nas equações (12) e (13):

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

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

De igual maneira, a situação é retratada pelas FIGURAS 13 (a) e (b):

FIGURA 13 – APLICAÇÃO DO CONCEITO DE SUPERPOSIÇÃO DOS EFEITOS APÓS INSERÇÃO DO FILTRO HARMÔNICO SOB PONTO DE VISTA DO (a) SUPRIDOR e (b) CONSUMIDOR



FONTE: SANTOS (2011).

Isto posto, dando continuidade à sistemática proposta, aplica-se o princípio da superposição dos efeitos a fim de se obter o valor da corrente harmônica total para determinada ordem h :

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

Doravante, se aplicam os conceitos de projeção dos fasores parciais de cada uma das fontes envolvidas sobre o fasor total para obtenção do rateio das proporções de responsabilidades perante a distorção harmônica constatada no PAC.

Todavia, certamente a aplicação deste método é restrita, uma vez que um pré-requisito é dispor de filtros harmônicos sintonizados nas frequências que se deseja analisar, aliado ao fato de que a presença deste componente em instalações elétricas convencionais não é tão comum.

2.6 MÉTODO DO CHAVEAMENTO CAPACITIVO

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 suplantar 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.

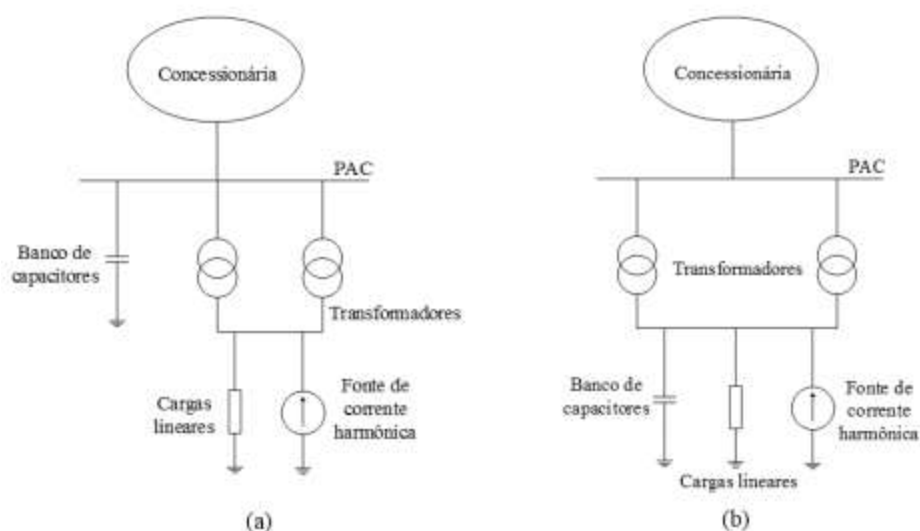
Como ressaltado pela própria autora:

Vale ressaltar que, muito embora a particularização utilizada para unidades capacitivas, efetivamente, 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. Não obstante a tal reconhecimento, sabidamente, a presença de bancos de capacitores destinados à correção do fator de potência de instalações sempre se apresenta como uma possibilidade concreta para as instalações reais, motivo pelo qual o cerne do processo encontra-se direcionado para a manobra de tal componente. (SANTOS, 2015, p.74).

Conforme mencionado anteriormente, a metodologia proposta por esta referência 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.

As FIGURAS 14 (a) e (b) estampam esquemas representativos de sistemas industriais didáticos com duas possíveis configurações quanto ao ponto de conexão das unidades capacitivas, quais sejam (a) no lado primário dos transformadores de potência e (b) no lado secundário dos transformadores de potência:

FIGURA 14 – DIAGRAMAS SIMPLIFICADOS DE UM PAC ENTRE CONCESSÁRIA E CONSUMIDOR, COM INSTALAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES NO (a) PRIMÁRIO E (b) SECUNDÁRIO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA



FONTE: SANTOS (2015).

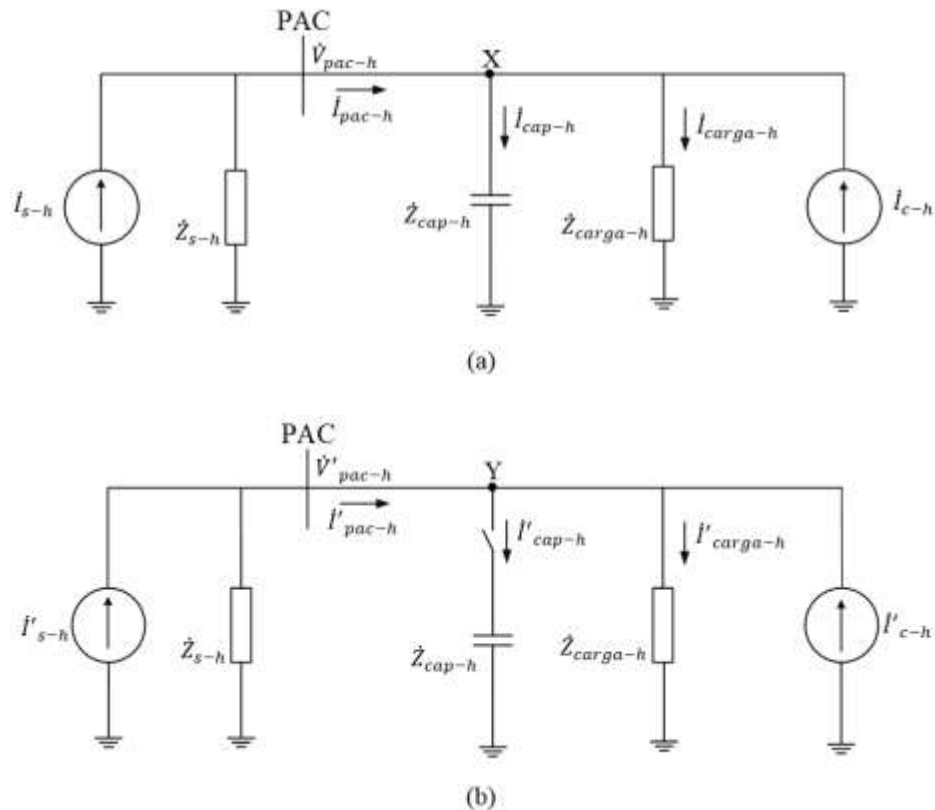
Ainda segundo SANTOS (2015), outro ponto de interesse a ser ressaltado é que, dada uma instalação real, não há necessidade de se efetuar o chaveamento da capacitância total do banco presente no complexo industrial, uma vez que o chaveamento de uma quantidade de capacitores que seja capaz de ocasionar 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 falam parte do arranjo industrial, apenas para utilização do procedimento.

Não obstante, para que nos 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.

Tomando como exemplo o arranjo proposto pela FIGURA 14(a), na qual o PAC coincide com o barramento de conexão do banco de capacitores e 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 FIGURAS 15(a), na qual o banco de capacitores encontra-se conectado ao PAC e 15(b), na qual o mesmo banco de capacitores foi desconectado do sistema.

FIGURA 15 – ARRANJO ELÉTRICO REPRESENTATIVO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CAPACITIVO E SUAS DUAS CONDIÇÕES OPERATIVAS: (a) BANCO DE CAPACITORES CONECTADO AO PAC e (b) BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO



FONTE: SANTOS (2015).

Onde, para cada ordem harmônica h , tem-se:

I_{s-h} e I'_{s-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema supridor para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

I_{c-h} e I'_{c-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao consumidor para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

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

$Z_{carga-h}$ – impedância harmônica de ordem h , vista a partir do ponto de chaveamento, excluindo a capacitância chaveada;

\dot{Z}_{cap-h} – impedância harmônica de ordem h do banco de capacitores chaveado;

\dot{V}_{pac-h} e \dot{V}'_{pac-h} – tensões harmônicas de ordem h no ponto de acoplamento para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

\dot{I}_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} – correntes harmônicas de ordem h no ponto de acoplamento para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

\dot{I}_{cap-h} e \dot{I}'_{cap-h} – correntes harmônicas de ordem h que fluem pelo capacitor nas condições operativas (a) e (b), respectivamente;

$\dot{I}_{carga-h}$ e $\dot{I}'_{carga-h}$ – correntes harmônicas de ordem h que fluem pela carga $\dot{Z}_{carga-h}$ nas condições operativas (a) e (b), respectivamente.

Fazendo uso da Lei de Kirchoff dos Nós ao nó X constante na FIGURA 15 (a), pode-se determinar que:

$$\sum \dot{I}_X = 0 \quad (15)$$

$$\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}_{cap-h} - \dot{I}_{carga-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (16)$$

Prosseguindo a análise do circuito sob a condição operativa (a), as correntes \dot{I}_{cap-h} e $\dot{I}_{carga-h}$ podem ser obtidas como equacionado em (17) e (18):

$$\dot{I}_{cap-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} \quad (17)$$

$$\dot{I}_{carga-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} \quad (18)$$

Ao substituir as equações (17) e (18) em (16), obtém-se (19):

$$\dot{I}_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (19)$$

Isolando o termo \dot{I}_{c-h} chega-se à equação (20):

$$i_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} + \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i_{pac-h} \quad (20)$$

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

$$\sum \dot{I}_Y = 0 \quad (21)$$

$$\dot{I}'_{pac-h} - \dot{I}'_{cap-h} - \dot{I}'_{carga-h} + \dot{I}'_{c-h} = 0 \quad (22)$$

Como nesta situação o capacitor se encontra desconectado do PAC, entende-se que \dot{I}'_{cap-h} é nula. Por outro lado, a corrente $\dot{I}'_{carga-h}$ pode ser obtida como indica (23):

$$\dot{I}'_{carga-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} \quad (23)$$

Tomando tais assunções, a equação (19) pode ser reescrita conforme mostra (24):

$$\dot{I}'_{pac-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} + \dot{I}'_{c-h} = 0 \quad (24)$$

Isolando o termo \dot{I}'_{c-h} na expressão anterior, obtém-se (25):

$$\dot{I}'_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - \dot{I}'_{pac-h} \quad (25)$$

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 $i_{s-h} \approx i'_{s-h}$ e $i_{c-h} \approx i'_{c-h}$, 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 as equações (20) e (25), de modo a obter (26):

$$\frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} + \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i_{pac-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i'_{pac-h} \quad (26)$$

Realizando apenas manipulações algébricas triviais em (26) no intuito isolar o termo $\dot{Z}_{carga-h}$, chega-se a (27):

$$\dot{Z}_{carga-h} = \frac{(\dot{V}_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h})}{i_{pac-h} - i'_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}}} \quad (27)$$

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} , i_{pac-h} e 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 da equação (27) 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 sugere a equação (28):

$$\dot{Z}_{carga-tot-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{Z}_{carga-h}}{\dot{Z}_{cap-h} + \dot{Z}_{carga-h}} \quad (28)$$

Na equação (28) tem-se:

$\dot{Z}_{carga-tot-h}$ – impedância harmônica de ordem h da unidade consumidora, incluindo a capacitância chaveada, vista a partir do ponto de chaveamento.

Cabe frisar que, uma vez que se fez uso do arranjo proposto pela FIGURA 14(a), isto é, a conexão do banco de capacitores realizada diretamente no PAC, pode-se dizer que $\dot{Z}_{carga-tot-h}$ é equivalente a \dot{Z}_{c-h} (impedância total da unidade consumidora vista a partir do PAC). Caso contrário, isto é, se o arranjo adotado fosse aquele proposto pela FIGURA 14(b), em que a comutação das unidades capacitivas ocorre no secundário dos transformadores de potência, as medições de tensões e correntes deveriam ter sido realizadas neste específico barramento e não no PAC.

Importante frisar que o fato da metodologia se dedicar à obtenção da impedância sob ponto de vista do consumidor \dot{Z}_{c-h} , e não à da impedância do supridor \dot{Z}_{s-h} , tem por pano de fundo o fato de que esta última é de mais fácil obtenção, uma vez que a distribuidora possui maiores condições de estimar este valor por meio de valores de suas redes elétricas.

Retomando o método estudado, a partir deste ponto (obtenção da impedância \dot{Z}_{c-h}), passa-se a fazer o uso seguro do método da superposição dos efeitos clássico, uma vez que, conforme mencionado anteriormente, os entraves para sua aplicação foram devidamente suplantados.

Sintetizando o procedimento proposto, em aderência aos procedimentos e desenvolvimentos apresentados, SANTOS, 2015, hierarquiza as etapas que devem ser cumpridas para atingimento do objetivo final (definição dos patamares de

responsabilidade perante constatação de distorções harmônicas num ponto de acoplamento comum:

1. Realização de medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de acoplamento comum em condição operativa normal da unidade consumidora, obtendo-se, assim, as grandezas \dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} ;
2. Desconexão de um banco de capacitores de impedância conhecida (\dot{Z}_{cap-h}), quer seja a unidade completa ou estágios deste;
3. Realização de novas medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de acoplamento comum, agora com o banco de capacitores desligado, obtendo-se as novas grandezas \dot{V}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} ;
4. Aplicação dos princípios sintetizados na equação (27), do presente trabalho, para obtenção da impedância $\dot{Z}_{carga-h}$;
5. Utilização da equação (28) para obtenção de $\dot{Z}_{carga-tot-h}$, que, no caso analisado, é a própria impedância do consumidor vista a partir do PAC e, assim, pode ser também chamada de \dot{Z}_{c-h} ;
6. Aplicação do método da Superposição convencional, conforme descrito no item 2.4 deste trabalho, para obtenção das parcelas de responsabilidades sobre as distorções harmônicas a serem atribuídas às partes envolvidas. (SANTOS, 2015, p.81).

Em síntese, além da sólida sedimentação equacional proposta pelo método, o fato do mesmo fazer uso de componente facilmente encontrado em instalações industriais torna-se um trunfo para sua aplicabilidade prática.

Ressalta-se, porém, que a aplicação do método se restringe a validações computacionais efetuadas no ambiente *Alternative Transient Program* (ATP).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A partir da análise da literatura em geral, e de trabalhos anteriormente desenvolvidos, constata-se que até o presente momento a solução para problemática aqui enfocada ainda se configura como um desafio, não obstante aos esforços já realizados em exaustivas investigações que buscaram soluções por meio de diferentes linhas de pesquisa. Nesse sentido, como já abordado, observam-se métodos que apenas se comprometem a definir a direcionalidade do fluxo de harmônicas, enquanto outros se preocupam em detectar os pontos de determinado

sistema onde estão situadas as principais fontes de distorção. Adentrando nessa temática, existem também propostas de métodos que se comprometem em definir as parcelas de responsabilidades competidas a cada uma das partes envolvidas e, nesse particular, algumas metodologias foram comprovadamente avaliadas como frágeis, em análises de desempenho feitas por trabalhos diversos. É relevante ressaltar também outras possibilidades descritas na literatura que, apesar de possuírem consistência técnico-científica, apresentam sérias lacunas, devido sobretudo à indisponibilidade de dados de entrada confiáveis para aplicação dos procedimentos necessários.

De modo a sintetizar os principais pontos dos métodos estudados, apresenta-se o quadro 1.

QUADRO 1 – COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS ESTUDADOS

Método	Objetivo	Campo de Aplicação	Facilidade de Aplicação	Fundamentação Teórica
Fluxo de Potência Harmônica	Direcionalidade	Prática	Ampla	Frágil
Corrente conforme e não conforme	Proporção	Prática	Ampla	Frágil
Superposição do Efeitos	Proporção	Teórica	Ampla	Sólida
Superposição Modificado	Proporção	Prática	Restrita	Sólida, desde que observadas premissas
Chaveamento Capacitivo	Proporção	Prática	Relativamente ampla	Sólida, desde que observadas premissas

FONTE: o autor (2016).

Diante dessa conjuntura, buscou-se uma metodologia atual que não sofresse das mesmas fragilidades dos princípios conhecidos até o momento, e, ao mesmo tempo, se valesse dos aspectos favoráveis de cada um deles. Este cenário à primeira vista paradoxal, é justamente o proposto por SANTOS (2015), trabalho este notório no âmbito da QEE, por tratar de maneira bastante simples, questões problemáticas no que tange à definição da impedância harmônica à jusante de um PAC que, uma vez suplantada, permite a utilização do método da superposição

clássico, princípio este que se baseia num princípio matemático amplamente conhecido e comumente aplicado à análise de circuitos elétricos.

Resta evidente, portanto, os motivos que levam a depositar confiança e merecer o dispêndio de esforços para avaliação da eficácia da metodologia do chaveamento capacitivo perante a problemática pautada neste trabalho, pois, uma vez que a reprodução das condições operativas pode ser facilmente efetuada, haja vista ser o banco de capacitores dispositivo comum nas instalações industriais e laboratoriais. Aliado a isto, o equacionamento proposto pelo método possui muita solidez, restando apenas que algumas premissas sejam observadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

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.

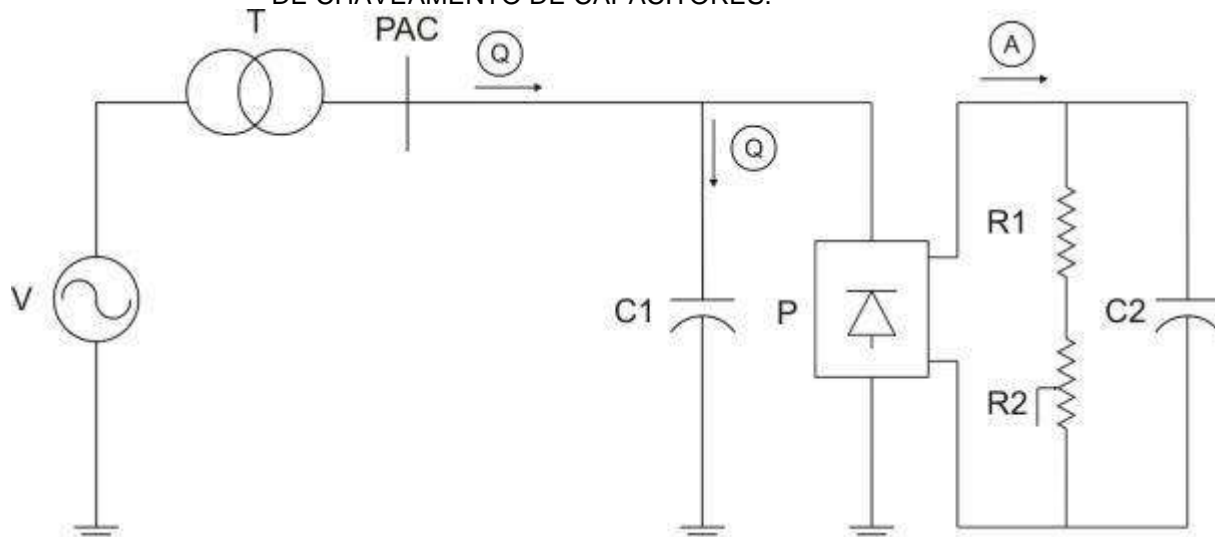
De igual maneira, a motivação para se realizar uma medição prévia à vazio, se respalda no mérito de se conhecer a característica intrínseca da fonte no que diz respeito às distorções harmônicas presentes, por mais baixas que sejam, além de tornar conhecidos os valores efetivamente fornecidos pela fonte,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

3.1 MATERIAIS

O arranjo proposto consiste na tradução física, isto é, reproduzir os diagramas propostos nas FIGURAS 15(a) e 15(b) fazendo uso de componentes

reais. Detalhes dos trechos do circuito serão comentados no desenvolvimento deste capítulo. O esquema geral do arranjo desenvolvido é ilustrado pela FIGURA 16:

FIGURA 16 – ARRANJO LABORATORIAL PROPOSTO PARA VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE CHAVEAMENTO DE CAPACITORES.



FONTE: o autor (2016).

A lista de materiais utilizados no supracitado arranjo se encontra detalhada na Tabela 1.

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 de corrente contínua (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 que $i_{c-h} \approx i'_{c-h}$, 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 1 – LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS NO ARRANJO LABORATORIAL

Legenda	Equipamento	Modelo	Quantidade
V	Fonte de Tensão Trifásica	Hipotronics MTA-4 300 V/MTC	1 un
T	Transformador de Potência Trifásico	WTW 15kVA 220/220 V Z=3,5%	1 un
P	Ponte Retificadora Trifásica 6 Pulsos	Semikron Semipont 3	1 un
C2	Capacitor Eletrolítico	330 μ F/ 400V	1 un
R1	Banco de Resistências	Eletron 3x10kW	1 un
R2	Resistência Variável	Eletele 50 Ω /500 W	1 un
C1	Capacitores	Inepar 1kVAr 600V	3un
Q	Qualímetro	Fluke 438 Series II Power Quality Analyzer	2 un
A	Alicate Amperímetro	Fluke i30S	1 un
-	Cabos	2,5mm ² 750VA	20m

FONTE: o autor (2016).

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). Isto implica no fato da fonte possuir uma distorção intrínseca, que será avaliada no capítulo a seguir. A FIGURA 17, colocada a seguir, apresenta o painel do dispositivo:

FIGURA 17 – FONTE UTILIZADA NOS ENSAIOS.



FONTE: O AUTOR (2016).

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, descritos mais adiante. O dispositivo é apresentado pela FIGURA 18.

Para compor a carga, utilizou-se banco de resistências 3x10 kW que foram ligadas em série. Este arranjo, por sua vez, foi conectado em série a uma resistência variável de 50 Ohms, elemento este que irá propiciar o ajuste do patamar de corrente mencionado anteriormente. Este conjunto de resistência foi conectado em paralelo a um capacitor eletrolítico de 330 μ F/ 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 FIGURA 19 apresenta o esquema de ligação do banco de resistências em

conjunto com a resistência variável, enquanto a FIGURA 20, demonstra a forma de ligação da ponte retificadora ao capacitor eletrolítico.

FIGURA 18 – TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZADO COMO IMPEDÂNCIA DA FONTE.



FONTE: o autor (2016).

FIGURA 19 – ESQUEMA DE LIGAÇÃO EM SÉRIE DO BANCO DE RESISTÊNCIAS DE 3x10 kW.



FONTE: O AUTOR (2016).

FIGURA 20 – DETALHE DA PONTE RETIFICADORA E DO CAPACITOR ELETROLÍTICO UTILIZADO NA CARGA.



FONTE: O AUTOR (2016).

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 FIGURA 21 e, posteriormente, conectados no ramo correspondente ao proposto pela FIGURA 15(b), apresentada anteriormente, quando da reprodução da condição operativa (a), ou seja, com o banco de capacitores conectado.

FIGURA 21 – FORMA DE CONEXÃO DOS CAPACITORES PARA FORMAÇÃO DO BANCO



FONTE: O AUTOR (2016).

Findadas as descrições dos componentes do arranjo, detalha-se a seguir a sequência de etapas realizadas em laboratório e alguns tratamentos de dados intermediários.

3.2 MÉTODOS

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.

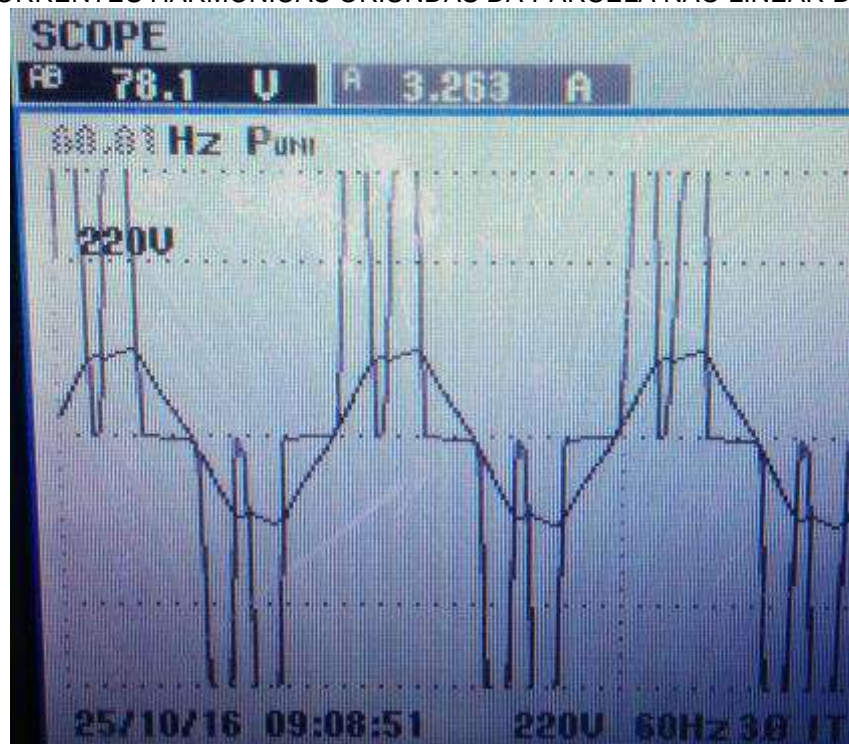
Inicialmente, o arranjo foi energizado à vazio, com tensão aplicada de 60 V RMS. Na sequência, após a formação da massa de dados iniciais, aplicou-se 127 V RMS. Esta sequência de dois patamares foi repetida para todas as etapas do ensaio laboratorial. O ponto do futuro PAC (até então, a vazio) foi monitorado 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 leitura 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), correspondente ao banco de capacitores desconectado, do método utilizado como referência, detalhada no capítulo antecessor.

Durante novo monitoramento do PAC por meio de um dos qualímetros, foi possível identificar o padrão distorcivo da carga, exemplificado na FIGURA 22.

FIGURA 22 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO DE SUPRIMENTO DISTORCIDA PELA INJEÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS ORIUNDAS DA PARCELA NÃO LINEAR DA CARGA



FONTE: o autor (2016).

Nota-se que a carga possui, de fato, uma característica não-linear que notoriamente afeta a forma de onda da tensão de fornecimento. Ressalta-se que esta etapa do ensaio corresponde à condição operativa (b) do método do chaveamento capacitivo, conforme apresentado no capítulo anterior, 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.

Aqui, consta uma importante etapa do processo: imediatamente pós 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 4,19 A.

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.

Um exemplo é o valor da reatância capacitiva X_C dos dispositivos utilizados no banco comutado foram calculados, de forma teórica, por meio da equação 29:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (29)$$

Obteve-se o valor de 360 Ω para X_C . Aplicando a equação 30, torna-se possível identificar o valor da capacitância C:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} \quad (30)$$

O valor calculado para frequência fundamental foi de 7,37 μ F. Contudo, medições com pontes RLC indicaram o valor médio de 6,38 μ F. A diferença se justifica por questões de envelhecimento das unidades capacitivas e dielétricos envolvidos. Uma vez que estão sendo utilizados dados de monitoramento reais, optou-se por utilizar o valor medido em detrimento ao teórico para fins de garantia de reprodutibilidade dos resultados.

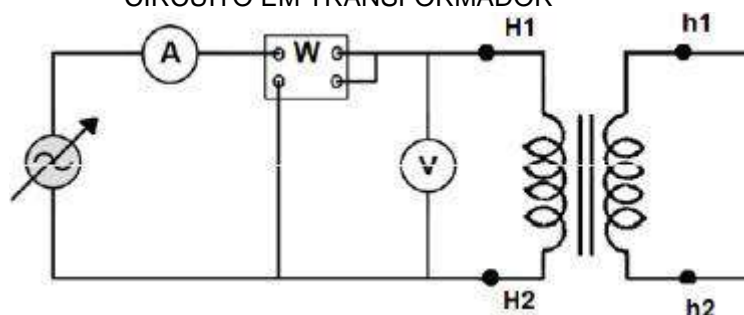
Seguindo o tratamento dos dados, realizou-se checagem análoga quanto aos valores teórico e prático da impedância do transformador utilizado à jusante da fonte

e à montante do PAC. Recordando, os valores dados do equipamento eram: 15kVA, tensão nominal 220 V (primário e secundário) e Z% 3,5.

Todavia, novamente fazendo uso dos ensaios laboratoriais para se obter os valores mais condizentes possíveis, realizou-se um ensaio de curto-circuito no transformador utilizado a fim de se obter as grandezas necessárias determinação dos valores da resistência e reatância indutivas equivalentes.

Em consonância com a proposta de KOSOW (2005), o ensaio de curto-circuito em um transformador de potência consiste em se curto circuitar os terminais de BT (no caso o equipamento utilizado possuía relação 1:1) e injetar uma tensão tal que o valor da corrente no secundário seja igual à nominal, estando monitoradas as grandezas tensão, corrente e potência elétrica. A FIGURA 23 demonstra a forma típica com a qual este arranjo é montado.

FIGURA 23 – DIAGRAMA DE LIGAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADOR



FONTE: adaptado de KOSOW (2005).

Toma-se nota, então, dos valores obtidos para cada uma destas grandezas para cada uma das fases. Conceitos de circuitos elétricos, detalhados ao longo do desenvolvimento a seguir, são utilizados para obtenção das demais grandezas atinentes ao equipamento. Os valores obtidos durante o ensaio são apresentados pela tabela 2.

TABELA 2 – VALORES OBTIDOS POR FASE NO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO NO ARRANJO LABORATORIAL

Fase	V _{cc} (V)	I _{cc} (A)	P _{cc} (W)
A	5,46	39,76	143
B	5,61	36,90	154
C	4,85	40,64	153

FONTE: o autor (2016).

Através da aplicação da equação 31, obteve-se o valor de da impedância equivalente Z_E :

$$Z_E = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (31)$$

Prosseguindo com o raciocínio, uma que o valor da potência de curto-circuito P_{CC} também é conhecida, pode-se calcular o valor da resistência equivalente R_E dado pela equação 32:

$$R_E = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (32)$$

Aplicando-se o relacionamento entre as potências ativa, aparente e reativa, pode-se, facilmente, obter o valor da reatância equivalente X_E , como denotado na equação 33:

$$X_E = \sqrt{Z_E^2 - R_E^2} \quad (33)$$

Os valores calculados para o transformador, na frequência fundamental, são sintetizados na tabela 3.

TABELA 3 – VALORES DAS GRANDEZAS CALCULADAS PARA O TRANSFORMADOR

Fase	Z_E (Ω)	R_E (Ω)	X_E (Ω)
A	0,14	0,09	0,10
B	0,15	0,11	0,10
C	0,12	0,09	0,08

FONTE: o autor (2016).

A partir dos valores fundamentais, calcularam-se, então os valores para cada frequência harmônica, obtendo-se o valor de \dot{Z}_{s-h} .

Findada a etapa de caracterização dos elementos RLC do circuito, partiu-se para análise dos dados disponibilizados pelos qualímetros. De início identificou-se que para o patamar de tensão aplicada de 60 V os valores de corrente foram muito baixos, especialmente no ramo do capacitor. Deste modo, decidiu-se por descartar

as medições oriundas deste, restando apenas aquelas provenientes da tensão de 127 V.

Uma vez que o equacionamento proposto pelo método do chaveamento de capacitores é aplicável a qualquer ordem harmônica e fase de rede, optou-se então por aplicá-lo de maneira explodida, isto é, para cada uma das três fases e ordem harmônica.

Destarte, aplicou-se então, a equação 34, idêntica à equação 27, transcrita aqui somente no intuito de facilitar a leitura, para as três fases na frequência fundamental e em cada ordem harmônica, obtendo-se assim, o valor da impedância harmônica da carga para cada frequência múltipla da fundamental.

$$\dot{Z}_{carga-h} = \frac{(\dot{V}_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}'_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}}} \quad (34)$$

A aplicação da supracitada equação leva ao valor da impedância do lado consumidor, mas ainda sem levar em consideração o banco de capacitores ligado em paralelo, quando conectado. Para esta impedância total, lançou-se mão da equação 35, idêntica à equação 28, transcrita aqui no afã de facilitar a leitura, para possibilitar a obtenção da impedância total à jusante do PAC.

$$\dot{Z}_{carga-tot-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{Z}_{carga-h}}{\dot{Z}_{cap-h} + \dot{Z}_{carga-h}} \quad (35)$$

Recordando que para correta aplicação do método da superposição clássico, faz-se mister o conhecimento de quatro variáveis: tensão (ou corrente) do supridor, impedância do supridor, impedância do consumidor e tensão (ou corrente) do consumidor.

Apesar de ter sido utilizada uma fonte de tensão como controle da energização do arranjo, para aplicação do método da superposição se utilizará o seu equivalente de Norton, isto é, a fonte de tensão será transformada em fonte de corrente. Isto se deve ao fato que, do ponto de vista do consumidor, torna-se melhor utilizar fontes de corrente para representar as injeções de harmônicas no circuito. Deste modo, os elementos ativos se definem.

As equações utilizadas para determinação das fontes de corrente do supridor I_{s-h} e do consumidor I_{c-h} são 36 e 37, respectivamente:

$$I_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (36)$$

$$I_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - \dot{I}_{pac-h} \quad (37)$$

No que concerne aos elementos passivos, a impedância do supridor \dot{Z}_{s-h} foi definida pelos dados do transformador, conforme já mencionado. Por sua vez, a impedância do consumidor \dot{Z}_{c-h} , que é a variável que tornava a aplicação do método da superposição inaplicável sob ponto de vista prático (muito embora inquestionável aplicabilidade teórica), foi determinada justamente pelo método do chaveamento capacitivo, ponto central avaliado por esta dissertação.

Deste modo, tem-se as quatro variáveis necessárias à aplicação do método da superposição convencional.

Uma vez que o conceito do método da superposição consiste na mensuração dos efeitos de cada uma das fontes sobre o circuito, e ainda, levando em consideração que no caso de um PAC temos duas fontes, a determinação dos valores de corrente atinentes a cada uma destas será possível por meio da aplicação de um divisor de correntes, expressado pelas equações 38 e 39 (idênticas às equações 6 e 7, aqui transcritas para facilitar a leitura), para a contribuição do supridor e consumidor, respectivamente.

$$I_{s-pac} = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + Z_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (38)$$

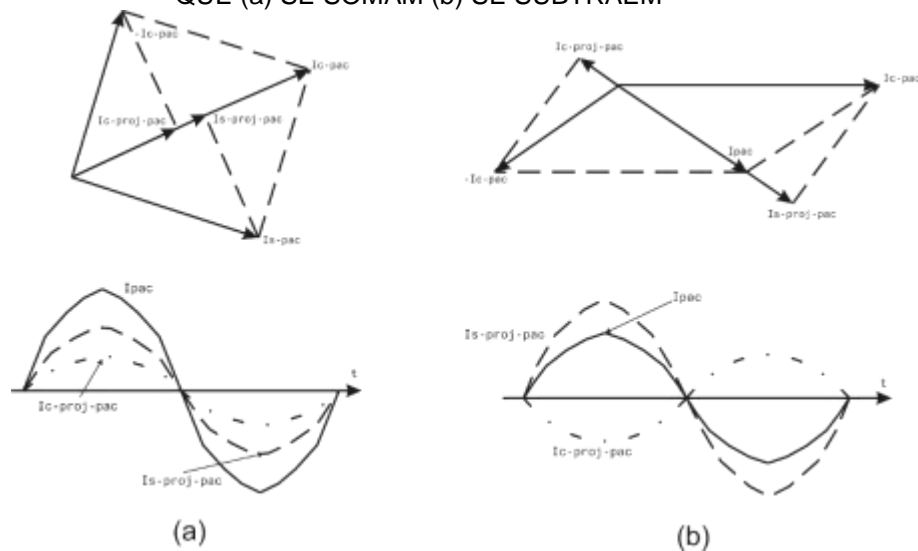
$$I_{c-pac} = \frac{\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + Z_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (39)$$

Uma vez determinadas as parcelas de injeção de corrente de cada agente, a aplicação do método da superposição, se resume a proceder a projeção dos fasores

I_{s-h} e I_{c-h} sobre o fasor da corrente total no PAC, I_{pac-h} , conforme indicado na FIGURA 9.

Quando desta projeção, pode-se deparar com duas situações distintas. A primeira, apresentada pela FIGURA 23 (a), se refere à condição em que a projeção dos fasores possuem o mesmo sentido e, portanto, indicam que as parcelas projetadas se somam para compor a corrente total. A segunda, ilustrada por meio da FIGURA 24 (b), se refere à conjuntura em que os fasores possuem sentidos opostos, indicando que, neste caso, as parcelas projetadas se subtraem para compor o fasor resultante.

FIGURA 24 – DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE TOTAL NO PAC EM COMPONENTES QUE (a) SE SOMAM (b) SE SUBTRAEM



FONTE: adaptado de XU e LIU (2000).

As avaliações dos resultados enquadrados nestas condições serão discutidas no próximo capítulo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em mãos os dados oriundos da aplicação do método da superposição dos efeitos, procedeu-se uma análise que tinha por intuito avaliar os resultados práticos da reprodução do método do chaveamento capacitivo.

Os quadros apresentados neste capítulo serão limitados às 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens harmônicas, tanto para facilitar a diagramação e leitura do presente trabalho, quanto pela baixa representatividade das ordens pares, em todo o espectro analisado, e das ímpares de ordens superiores à nona. De qualquer maneira, conforme descrito no capítulo anterior, o método foi aplicado a todas as ordens harmônicas medidas (30), estando os quadros contemplando todas as ordens harmônicas disponíveis para eventuais consultas no Apêndice A.

4.1 VERIFICAÇÃO DAS PREMISSAS DO MÉTODO

Durante o desenvolvimento do equacionamento apresentado no capítulo 3, assumiu-se que, uma vez que as cargas não lineares presentes no arranjo estudado se comportam como fontes de correntes e, por conseguinte, permanecem constantes antes e após a comutação do banco de capacitores, assumiu-se que $\dot{I}_{s-h} \approx \dot{I}'_{s-h}$ e $\dot{I}_{c-h} \approx \dot{I}'_{c-h}$, o que significa 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), correspondentes ao banco de capacitores conectado e desconectado, respectivamente. Estas condições se encontram ilustradas pelas FIGURAS 15(a) e (b), respectivamente, no capítulo 2.

Deste modo, 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, são apresentados no quadro 2, enquanto da corrente I'_{pac-h} , que se refere à situação operativa com o capacitor desconectado, no quadro 3.

QUADRO 2 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO

Ordem h	I _{pac-h}					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	0,37	29,41	0,30	-75,07	0,41	-196,40
5	4,19	137,54	3,86	-351,69	3,52	-104,44
7	1,74	-68,29	1,39	-321,02	1,90	-201,95
9	0,20	-149,87	0,17	-133,18	0,37	37,29

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 3 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO

Ordem h	I _{pac'-h}					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	0,36	25,11	0,39	-73,26	0,49	-207,64
5	4,22	139,66	3,96	-350,12	3,54	-102,65
7	1,78	-61,94	1,42	-316,02	1,98	-196,61
9	0,23	-148,91	0,16	-122,36	0,38	41,47

FONTE: o autor (2016).

Para efeitos de comparação quantitativa entre os resultados obtidos, adotou-se o indicador *Mean Average Percentual Error* (MAPE), ou, em língua portuguesa, Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), que consiste na média da diferença absoluta entre os valores previstos e encontrados, expressa em percentagem dos valores últimos. A forma de cômputo deste indicador é apresentada pela equação (40).

$$EMPA = \frac{\sum_{i=1}^n |EP_i|}{n} \quad (40)$$

Onde:

EP_i = erro percentual do elemento de ordem i;

n = quantidade de elementos observados.

Os resultados obtidos para este indicador, quando comparados os valores das magnitudes de corrente antes e depois do chaveamento são apresentados no quadro 4.

QUADRO 4 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE ANTES E APÓS A INSERÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Ordem h	EP I _{an} (%)	EP I _{bn} (%)	EP I _{cn} (%)	EMPA (%)
3	2,01	30,00	18,82	16,94
5	0,81	2,58	0,78	1,39
7	1,95	2,32	4,07	2,78
9	12,71	5,75	2,71	7,06

FONTE: o autor (2016).

Como se nota por meio de análise dos indicadores apresentados, as variações nas ordens harmônicas com maior representatividade (quinta e sétima) não foram expressivas perante as duas condições operativas. As maiores variações foram verificadas na terceira ordem, que possui patamares bastante reduzidos em relação à distorção harmônica total, o que explica a elevada variação percentual.

Além das magnitudes e defasamento angular, outro ponto que pode ser avaliado para checagem da premissa em análise é o espectro harmônico das correntes supra analisadas. Os quadros 5 e 6 apresentam os valores de Distorção Individual de Corrente (DII)% para cada uma das ordens harmônicas analisadas, por fase, para a corrente no PAC contendo o banco de capacitores conectado e desconectado, respectivamente.

QUADRO 5 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO

Ordem h	I _{an}	I _{bn}	I _{cn}
	DII (%)	DII (%)	DII (%)
3	4,72%	3,69%	5,27%
5	53,80%	47,79%	45,19%
7	22,42%	17,20%	24,45%
9	2,60%	2,08%	4,81%

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 6 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO

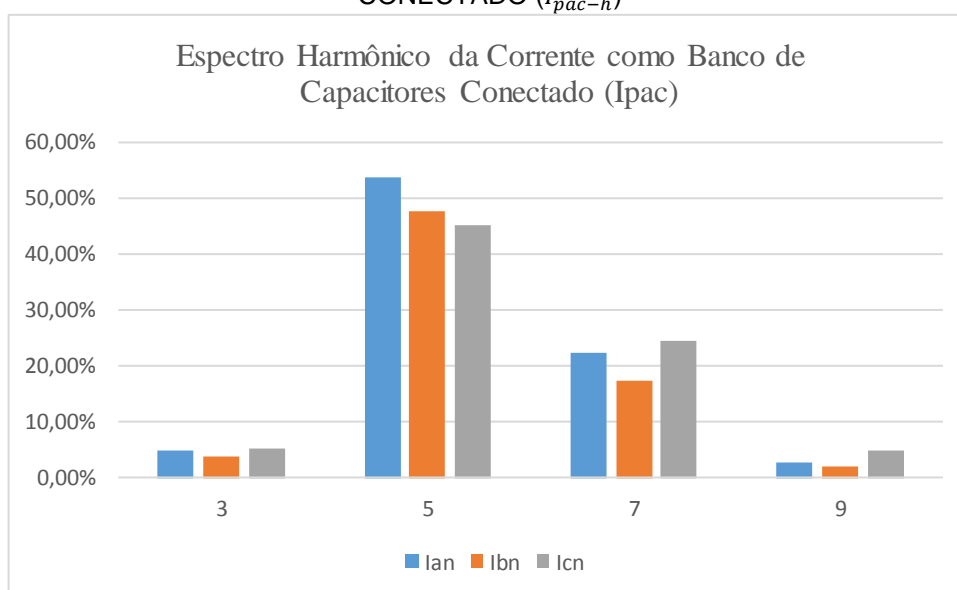
Ordem h	I _{an}	I _{bn}	I _{cn}
	DII (%)	DII (%)	DII (%)
3	4,70%	4,94%	6,41%
5	55,01%	50,54%	46,63%
7	23,18%	18,15%	26,05%
9	2,98%	2,03%	5,06%

FONTE: o autor (2016).

O EMPA das DTIs obtido por fase foi de 5,37%. Obviamente, a comparação do indicador DTI deve ser utilizada com parcimônia, especialmente pela contribuição desuniforme das ordens harmônicas mais e menos significantes.

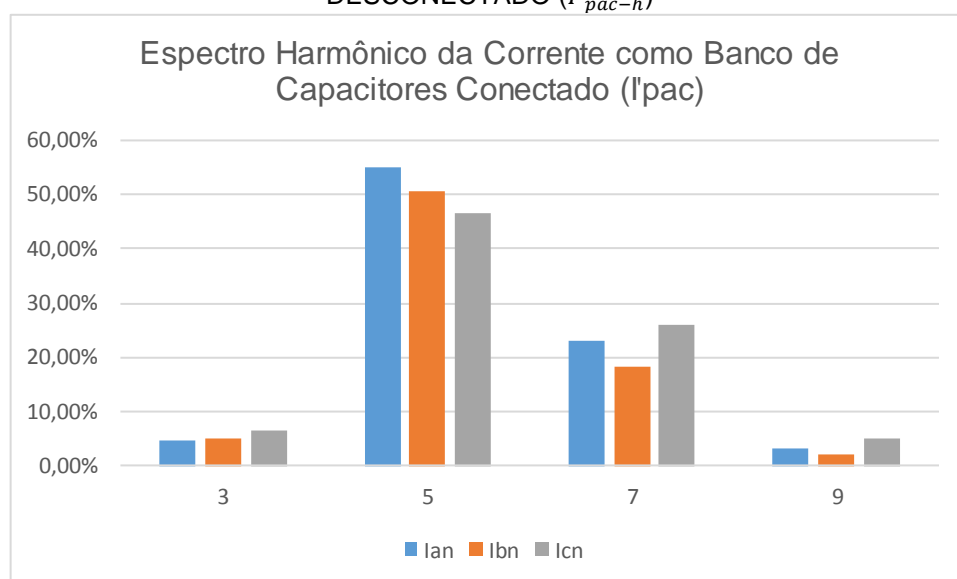
Para fins de melhor visualização, apresentam-se os mesmos dados dos quadros 5 e 6 no formato gráfico, com exceção da corrente fundamental, suprimida para facilitar a visualização, contidos nos gráficos 1 e 2, respectivamente:

GRÁFICO 1 – ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO (I_{pac-h})



FONTE: o autor (2016).

GRÁFICO 2 – ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO (I'_{pac-h})



FONTE: o autor (2016).

Conclui-se que perante tais fatos é possível dar prosseguimento à análise de dados.

4.2 VERIFICAÇÃO DO PADRÃO INTRINSECO DA FONTE DE TENSÃO

Seguindo o trâmite necessário para obtenção das variáveis necessárias à aplicação do método da superposição convencional, voltam-se os olhares sobre a fonte de tensão utilizada no ensaio. Conforme mencionado no capítulo anterior, a fonte utilizada não possuía controle na forma de onda senoidal, o que significa que não se pode descartar a presença de distorções harmônicas intrínsecas à mesma. Dos dados oriundos da medição isolada da fonte (isenta de qualquer tipo de carga), obtém-se as tensões apresentadas no quadro 7.

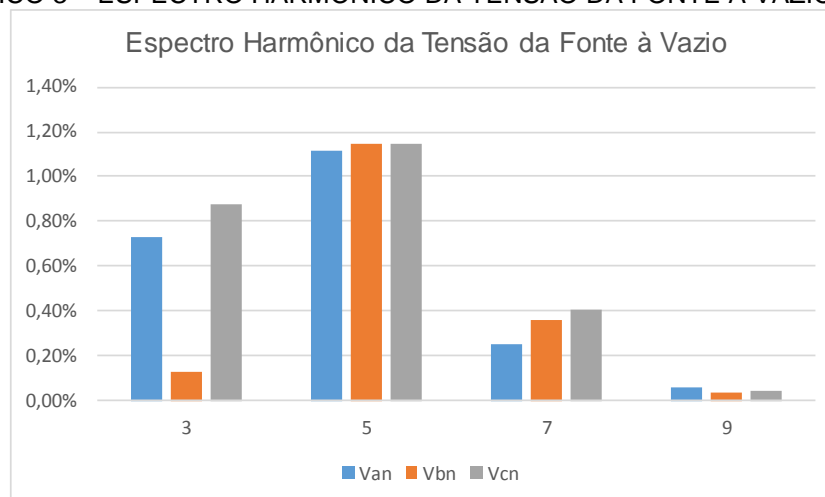
QUADRO 7 – VALORES DAS TENSÕES DE FASE VERIFICADAS DURANTE O MONITORAMENTO DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE CARGA

Ordem h	Vs-h					
	Van		Vbn		Vcn	
	Módulo (V)	Ângulo (°)	Módulo (V)	Ângulo (°)	Módulo (V)	Ângulo (°)
3	0,92	175,30	0,16	0,16	1,10	-217,29
5	1,41	12,55	1,46	1,46	1,44	-109,41
7	0,32	114,29	0,45	0,45	0,51	-104,45
9	0,07	-57,88	0,04	0,04	0,05	-229,23

FONTE: o autor (2016).

O perfil do espectro harmônico desta tensão pode ser ver observado por meio do gráfico 3.

GRÁFICO 3 – ESPECTRO HARMÔNICO DA TENSÃO DA FONTE À VAZIO



FONTE: o autor (2016).

Como se identifica, os maiores patamares de distorção harmônica são de 5ª e 3ª ordem, em patamares baixos, mas não desprezíveis. Posteriormente este item será novamente discutido.

4.3 OBTENÇÃO DOS VALORES DE IMPEDÂNCIA DO SUPRIDOR

No que tange à impedância do supridor, recordando os conceitos abordados no capítulo anterior, mais precisamente nas equações 31, 32 e 33, bem como, resumidos na tabela 2, utilizou-se os valores em termos da frequência fundamental para o propagar o entendimento às demais frequências objeto de análise, conforme demonstrado no quadro 8.

QUADRO 8 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO SUPRIDOR OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES ORIUNDOS DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO À MONTANTE DO PAC

Ordem h	Zs-h					
	Zan		Zbn		Zcn	
	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)
3	0,32	73,73	0,33	69,64	0,24	67,69
5	0,52	80,07	0,52	77,45	0,38	76,17
7	0,73	82,87	0,72	80,96	0,53	80,02
9	0,93	84,44	0,92	82,95	0,68	82,21

FONTE: o autor (2016).

Como se nota, à medida que se eleva a ordem harmônica, o valor do módulo e do ângulo da impedância aumentam, devido ao incremento da reatância indutiva perante altas frequências, o que já era esperado.

Retomando raciocínio apresentado anteriormente, o método da superposição possui duas aplicações duais: tensão e corrente. Desta maneira, faz-se mister que os valores de tensão do equivalente de Thévenin sejam convertidos em valores de corrente, tornando-se assim, o equivalente de Norton, ou ainda, os valores de correntes harmônicas da carga sejam convertidos para equivalentes de tensão. Optou-se por transformar os valores da fonte de tensão em corrente, adotando, portanto, o método da superposição das correntes, tal como detalhado no item 2.4.2. A motivação para tal parte do fato de que os dados em termos do consumidor são mais facilmente obtidos em termos de corrente monitoradas durante os ensaios realizados, além do fato que ao final do método, se deseja obter os valores de proporção das injeções de corrente.

Para obtenção do equivalente de corrente da fonte de tensão utilizou-se, inicialmente, a transformação do circuito equivalente de Thévenin (no caso em pauta, composto pela fonte de tensão e impedância do transformador) no equivalente de Norton. Como esta transformação, sabidamente, não interfere no comportamento do circuito, tampouco nos resultados finais, não há qualquer objeção quanto à sua aplicação. Os valores resultantes de tal conversão são apresentados no quadro 9.

QUADRO 9 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS APÓS A CONVERSÃO DAS TENSÕES DE THÉVENIN EM CORRENTES DE NORTON

Ordem h	Is-h					
	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	2,97	101,02	0,47	104,86	4,61	82,81
5	16,28	-43,82	20,16	-176,59	20,06	61,88
7	6,19	121,94	6,69	-146,08	8,97	-17,45
9	0,38	21,15	0,87	38,73	1,80	-143,87

FONTE: o autor (2016).

Uma vez que os altos patamares de corrente se fizeram presentes, em especial na corrente fundamental, optou-se por realizar um confrontamento entre os valores encontrados pela mera conversão dos equivalentes Thévenin em Norton, com a aplicação de um segundo método, a fim de se confrontar os resultados e verificar sua verossimilidade. Deste modo, fez-se uso da equação 36, que faz uso de outros conceitos de análise de circuitos elétricos. Os valores encontrados são apresentados pelo quadro 10.

QUADRO 10 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Ordem h	Is-h					
	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	3,11	94,58	0,17	104,72	4,69	87,76
5	12,10	-44,30	16,31	-177,75	16,66	59,02
7	4,48	125,90	5,31	-147,40	7,08	-16,24
9	0,18	11,07	0,70	36,79	1,42	-144,17

FONTE: o autor (2016).

Novamente se faz uso do EMPA para constatação de que as metodologias são aderentes. Os erros resultantes da comparação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias são resumidos no quadro 11.

QUADRO 11 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE DO SUPRIDOR OBTIDOS POR MÉTODOS DISTINTOS

Ordem h	EP Ian (%)	EP Ibn (%)	EP Icn (%)
3	4,36	171,21	1,77
5	34,61	23,58	20,39
7	38,07	26,07	26,79
9	109,25	23,81	26,31

FONTE: o autor (2016).

Como se nota, as variações mais expressivas em termos percentuais não ocorrer nas ordenas harmônicas que possuem patamares mais elevados, em especial, na corrente fundamental, motivador da busca de um segundo método para comparação. Este ponto específico, se explica por ser um valor teórico, sem representatividade física (esta corrente não será medida no circuito), uma vez que estamos tratando de uma fonte fornecendo 127 V em série com uma impedância muito baixa (transformador). No equivalente de corrente, o comportamento real será que toda esta corrente teórica será drenada para esta baixa impedância, uma vez de acordo com a teoria de circuitos elétricos, as impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton são idênticas, e apenas uma parcela será, de fato, fornecida à carga.

Em síntese, os dados do supridor utilizados no método da superposição foram dados pelos quadros 8 (\dot{Z}_{s-h}) e 10 (\dot{I}_{s-h}).

4.4 OBTENÇÃO DOS VALORES DAS CORRENTES DO CONSUMIDOR

Partindo agora para análise de dados à jusante do PAC, isto é, sob ponto de vista do consumidor, inicia-se, novamente, retomando conceitos já apresentados anteriormente, a obtenção dos dados de interesse.

No que diz respeito às correntes harmônicas da carga, por meio da aplicação da equação 37, obteve-se os valores apresentados no quadro 12.

QUADRO 12 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Ordem h	Ic-h					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	0,33	129,88	0,24	106,26	0,71	-63,48
5	6,98	15,10	11,10	-140,60	5,72	107,55
7	2,34	107,36	1,52	-51,76	1,68	77,64
9	0,06	111,44	0,15	99,79	0,53	-91,48

FONTE: o autor (2016).

Como se nota, a carga possui um padrão distorcivo, especialmente nas quintas e sétimas ordens harmônicas

4.5 OBTENÇÃO DOS VALORES DAS IMPEDÂNCIAS DO CONSUMIDOR

Não obstante, resta identificar os valores das impedâncias harmônicas sob a ótica do consumidor. Eis justamente o ponto central de contribuição do método do chaveamento capacitivo, pois, lembrando, este era o grande empecilho que restringia a utilização do método da superposição convencional.

De acordo com a aplicação das equações 34 e 35, obteve-se, respectivamente, as impedâncias harmônicas da carga a partir da ponte retificadora e da carga total (englobando o banco de capacitores), cujos valores são, respectivamente, apresentados pelos quadros 13 e 14.

QUADRO 13 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS EQUIVALENTE DO CONSUMIDOR

Ordem h	$Z_{-carga-h}$					
	Z _{an}		Z _{bn}		Z _{cn}	
	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)
3	2,12	98,70	2,61	-105,57	2,11	-111,86
5	1,45	-11,80	1,30	21,40	2,33	-112,34
7	6,55	73,58	2,44	-34,99	1,79	-68,49
9	1,81	-77,81	6,05	-114,18	2,98	35,16

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 14 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS TOTAIS DO CONSUMIDOR

$Z_{tot-carga-h}$						
Ordem h	Zan		Zbn		Zcn	
	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)
3	2,15	99,05	2,57	-105,15	2,08	-111,35
5	1,45	-15,58	1,30	27,09	2,32	-3,74
7	7,31	109,82	2,36	-56,19	1,74	-58,27
9	1,74	-87,43	5,54	-47,23	2,94	-14,69

FONTE: o autor (2016).

4.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

Definidos as magnitudes e ângulos dos quatro elementos ativos e passivos que compõe o circuito equivalente da superposição num PAC, conforme proposto na FIGURA 6, torna-se possível aplicar tal conceito, aclarados por meio das FIGURAS 7(a) e (b).

Aplicando-se as equações 38 e 39, foram determinadas as correntes parciais I_{s-pac} e I_{c-pac} que serão posteriormente projetadas sobre a corrente total no PAC, tabulados por meio dos quadros 15 e 16, respectivamente.

QUADRO 15 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR

$I_{s-pac-h}$						
Ordem h	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)
3	0,41	72,49	0,03	-81,24	0,61	-93,33
5	4,26	30,82	5,04	-141,15	2,64	129,94
7	0,41	101,33	2,02	-25,25	2,71	107,31
9	0,20	173,79	0,13	158,86	0,33	-60,59

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 16 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR

$I_{c-pac-h}$						
Ordem h	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (A)	Ângulo ($^\circ$)

3	0,29	133,11	0,27	105,50	0,81	-63,60
5	6,78	-5,44	8,59	-154,36	5,49	98,57
7	2,15	109,74	1,89	-66,76	2,11	62,89
9	0,13	102,29	0,17	91,69	0,53	-104,79

FONTE: o autor (2016).

Antes se proceder a análise da contribuição das componentes de corrente na corrente total do PAC, aplicou-se a equação 8, que nada mais é que a lei de Kirchoff, a fim de se obter uma prova real de que esta relação foi preservada. O resultado é apresentado pelo quadro 17.

QUADRO 17 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS TOTAIS NO PAC OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA LEI DE KIRCHOFF DOS NÓS

Ordem h	I_{pac-h}					
	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	0,37	29,41	0,30	-75,07	0,41	163,60
5	4,19	137,54	3,86	8,31	3,52	-104,44
7	1,74	-68,29	1,39	38,98	1,90	158,05
9	0,20	-149,87	0,17	-133,18	0,37	37,29

FONTE: o autor (2016).

A fim de se verificar a aderência dos resultados, analisam-se novamente os valores de EMPA entre o valor medido e o obtido por meio indireto. Os valores do EMPA só possuem valores diferentes de zero a partir do 12º algarismo significativo. Estes valores são tão ínfimos que a apresentação em forma de quadro se torna desnecessária.

Isto também significa que os valores obtidos são praticamente idênticos aos da corrente I_{pac-h} medidos, cujas diminutas discrepâncias podem ser facilmente explicadas pelos arredondamentos nos cálculos e conversões intermediários.

4.7 PROJEÇÕES DOS FASORES DE CORRENTE

Uma vez constatada a aderência aos valores obtidos por meio do equacionamento e aqueles efetivamente medidos durante no experimento laboratorial, torna-se possível, finalmente, determinar os valores das projeções das contribuições das correntes do supridor e consumidor sobre a corrente total do PAC.

Os valores destas projeções, em termos de magnitude e ângulo são apresentados nos quadros 18 e 19.

QUADRO 18 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC

$I_{s-proj-pac-h}$						
Ordem h	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	1,11	43,07	0,08	-6,18	1,48	103,07
5	1,02	-106,72	1,30	-149,46	0,75	-125,62
7	0,40	-82,22	1,86	68,38	1,07	84,32
9	1,00	-36,34	0,77	-67,96	0,88	-97,88

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 19 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC

$I_{c-proj-pac-h}$						
Ordem h	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
3	0,78	103,70	0,92	-179,43	1,96	132,80
5	1,62	-142,98	2,22	-162,67	1,56	-156,99
7	1,03	-157,07	1,76	100,27	1,39	130,15
9	0,62	-107,85	1,01	-135,13	1,42	-142,08

FONTE: o autor (2016).

Por fim, as proporções entre os módulos das correntes projetadas e a corrente total no PAC são resumidas pelo quadro 20. Estes valores representam a contribuição de cada agente envolvido no ponto avaliado (no caso, o PAC).

QUADRO 20 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC

I_{pac-h}						
Ordem h	lan		lbn		lcn	
	Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga
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%

FONTE: o autor (2016).

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.

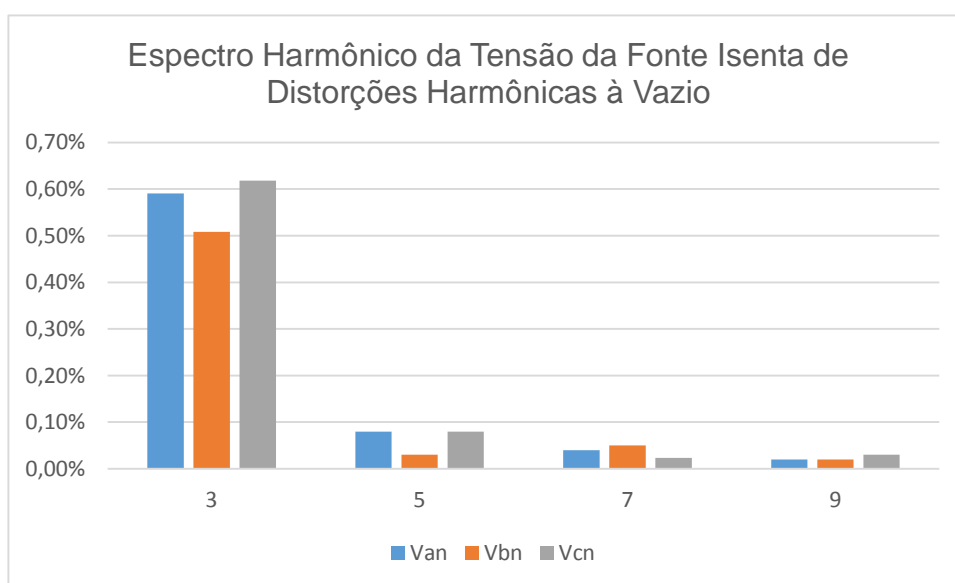
Contudo, verifica-se também que existe uma grande disparidade entre fases de uma mesma ordem harmônica. As hipóteses para tal podem ter diversas origens, tais como: real desequilíbrio na carga, devido ao comportamento do chaveamento da ponte retificadora a seis pulsos, posição e compatibilidade dos sensores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

4.8 CONFRONTAMENTO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Visando ratificar os resultados obtidos na reprodução laboratorial do método em estudo, optou-se por proceder o mesmo ensaio, porém, desta vez, dispondo de uma fonte isenta de qualquer tipo de distorção harmônica. Deste modo, assume-se que a contribuição do supridor deve ser nula, ou patamares próximos a isto. O modelo utilizado foi o MX30 do fabricante *California Instruments*. Trata-se de uma fonte que opera de forma mono ou trifásica, em corrente alternada ou contínua, disponibilizando até 30kVA, com tensão parametrizável de 0 a 300 volts, inclusive com possibilidade de injeção controlada de níveis de distorção harmônica em ordens específicas. A principal motivação de sua seleção foram os baixos níveis de distorção harmônica total, que se situam abaixo de 0,5% para frequências em níveis costumeiramente nominais das redes de distribuição (16 - 66 Hz), abaixo de 1% entre os patamares intermediários (66 - 500 Hz), e abaixo de 1,25% para frequências acima destes.

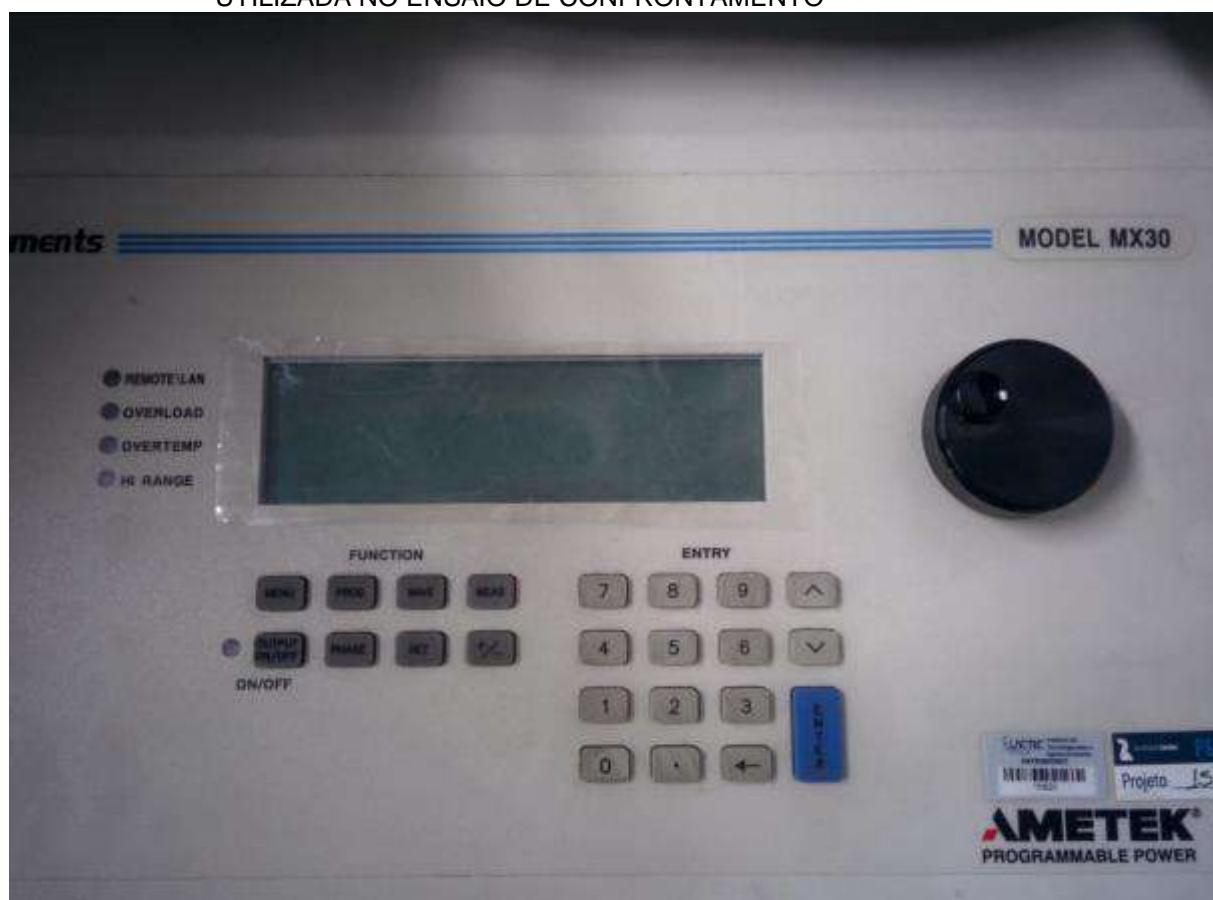
Antes de iniciar a reprodução do ensaio em sim, realizou-se uma medição com o arranjo energizado a vazio, isto é, isento de carga. O perfil do espectro harmônico da fonte de tensão pode ser verificado através do gráfico 4, ao passo que o painel do dispositivo pode ser visualizado na figura 25:

GRÁFICO 4 – ESPECTRO HARMÔNICO DA TENSÃO DA FONTE ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS À VAZIO



FONTE: o autor (2017).

FIGURA 25 – PAINEL DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS UTILIZADA NO ENSAIO DE CONFRONTAMENTO



FONTE: o autor (2017).

Como se nota, o conteúdo de quinta harmônica outrora predominante foi eliminado, restando apenas, um conteúdo de terceira ordem, acompanhado de patamares ínfimos das demais ordens.

Em continuidade ao confronto proposto, configurou-se o mesmo arranjo descrito no capítulo 3, apenas com a substituição da fonte de tensão anteriormente utilizada (Hipotronics MTA-4 300 V/MTC), pelo modelo descrito acima, e posteriormente, aplicou-se o mesmo equacionamento também já detalhado aos dados extraídos dos medidores/registradores. Os resultados podem ser verificados no quadro 21.

QUADRO 21 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC COM FONTE ISENTA DE DISTORÇÃO

I_{pac-h}						
Ordem h	Ian		Ibn		Icn	
	Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga
3	50,31%	49,69%	50,24%	49,76%	50,13%	49,87%
5	0,24%	99,76%	0,76%	99,24%	15,36%	84,64%
7	3,23%	96,77%	1,53%	98,47%	12,84%	87,16%
9	66,21%	33,79%	23,11%	76,89%	64,35%	35,65%

FONTE: o autor (2017).

Como se nota, os resultados corresponderam à expectativa inicialmente traçada na quinta e sétima ordem, caracterizando uma nítida predominância de responsabilidade da carga, uma vez que a fonte não injeta distorção harmônica. Por outro lado, os valores encontrados na terceira e nona ordem apresentaram comportamento distinto.

As possíveis origens de tais discrepâncias são uma possível ressonância entre o banco de capacitores e a carga, impondo desta forma, um fluxo de corrente superior ao esperado nestas ordens com resultados adversos. Outra hipótese formulada, foi que justamente pelo fato da fonte de tensão ser estanque a pequenas variações de carga, não houve a variação de patamares de tensão no PAC necessários para criação dos dois estágios operativos, premissa do método do chaveamento capacitivo. Isto se respalda no fato de que na frequência fundamental, os valores de tensão (magnitude) verificados com e sem o banco de capacitores conectados foram exatamente os mesmos em duas das três fases, impossibilitando inclusive, a aplicação do equacionamento proposto.

Não obstante, a fonte possui, de fato, uma pequena parcela de terceira harmônica, o que faz com que a expectativa de predominância de responsabilidade da carga, nesta frequência específica, existir, mas não ser tão proeminente como na nona ordem, por exemplo.

Em verdade, quando se refere à fonte, há de se recordar que a adoção de um transformador como caracterizador da impedância do ponto de vista do supridor também pode ter contribuído para atribuição de tais percentuais de responsabilidades da fonte, uma vez os resultados nas frequências sem expectativa de incumbência ao supridor também foram destoantes entre fases, o que pode condiz o desequilíbrio verificado na máquina estática. Adicionalmente, a magnetização do transformador pode ter exasperado a presença de algumas ordens específicas (relacionadas à sequência zero).

Observando-se todas as ordens harmônicas medidas (2^a a 30^a) houve uma atribuição média de 71,98% à carga para 28,02% para a fonte.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma análise dos métodos atualmente presentes na literatura identificando suas sedimentações, virtudes e fragilidades. Por meio de análise comparativa entre os mesmos, definiu como método a ser estudado aquele intitulado método do chaveamento capacitivo, que possui os 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 aderente 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, pode-se afirmar que é possível utilizar o 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.

Por meio da realização de um ensaio dispondo de uma fonte com controle na forma de onda da tensão (puramente senoidal) foi possível realizar um confronto perante uma condição em que responsabilidade do consumidor é predominante. Tal confronto permitiu concluir que pelo fato do conceito matemático aplicado se estender a toda e qualquer condição operativa, pode-se esperar resultados condizentes com a realidade física do arranjo que se esteja ensaiando.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a instigar a continuidade das linhas de trabalho propostas por esta dissertação, sugerem-se propostas de trabalhos futuros segmentados em duas vertentes:

a) Tópicos que complementaríamos o escopo do presente trabalho:

- Análise da existência de um valor de capacitância ótimo para o chaveamento;
- Averiguar a influência do tipo de retificação da carga na eficácia do método;
- Proceder o mesmo ensaio com uma carga mais equilibrada, a fim de identificar se o comportamento de contribuição entre fases se comporta de forma mais linear;
- Simular outras condições operativas sob condições de controle de distorção da fonte;
- Realizar a projeção das contribuições em termos da superposição de tensões.

b) Tópicos que propiciariam avanço às contribuições desta dissertação:

- Proceder análise de PACs com fluxo de potência bilateral (instalações consumidoras e geradoras);
- Utilização de banco de capacitores dotados de dispositivos capazes de atenuar ou eliminar eventuais efeitos de ressonância com a carga;
- Implementação do arranjo em um qualímetro portátil para verificação dinâmica de PACs.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Anexo I da Nota Técnica 105/2014 -SRD/ANEEL - Relatório 5 - Nota Técnica 105/2014-SRD/ANEEL**. Brasília, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8. Revisão 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2016.

AKAGI, H., TANAKI, T., **A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits**. IEEE Transactions Power Delivery, v. 10, n. 4, p. 1737-1742, 1995.

ANTUNES, F.L.M.; LEÃO, R.F., SAMPAIO, R.P.S., **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Campus, Rio de Janeiro, 2014.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R., **Power System Harmonics – Second Edition**, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2003.

AZOUAOU, R., LEUIMI, S., RABAHALLAH, S., **Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems**. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2004. p. 944-947.

BARCÓN, S.; GUERRERO, R.; MARTÍNEZ, I., **Calidad de la Energía: Factor de potencia y filtrado de armónicas**. McGrawHill, Mexico, 2012.

BARROS, M. T. C., LEIRIA A., MORCHED, A., **Identification of harmonic content and their origin in power networks**. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003.

CASE, J. D., SWART, P. H., Van WYK, J. D., **On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks**. European Transactions Electric Power, v. 6, n. 6, p. 391-396, 1996.

COSTA, F. H., **Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) UFU, Uberlândia, 2009.

COSTA, F. H., OLIVEIRA, J.C., SANTOS, I. N., SILVA, S. F. P., **A case study of sharing the harmonic voltage distortion responsibility between the utility and the consumer**. Renewable Energies and Power Quality Journal, n. 7, paper 327, 2009.

COSTA, F.H., OLIVEIRA, J. C., SANTOS, I. N., **Avaliação do desempenho das metodologias para a representação de consumidores visando ao compartilhamento das distorções harmônicas**. VIII CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, Blumenau, 2009.

CRISTALDI, L.; FERRERO, A., **Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality**. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, v. 44, n. 3, p. 683-685, 1995.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHN, M F.; SANTOSO, S.; BEATY, W., **Electrical Power Systems Quality** – Third Edition, McGraw-Hill, New York, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION, **Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks**, 2010.

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.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, **Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções**. São Paulo, 2001.

KOSOW, I., **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15ª edição, Globo, São Paulo, 2005.

LEIRIA, A.; MORCHED, A.; BARROS, M. T. C., **Identification of harmonic content and their origin in power networks**. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003.

LIN, C. H., LIN, W. M., TU, K. P., WU, C. H., **Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network**. IEEE Transactions Power Delivery, v. 20, n. 3, p. 2166-2173, 2005.

LIN, W. M.; LIN, C. H.; TU, K. P.; WU, C. H., **Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network**. IEEE Transactions Power Delivery, v. 20, n. 3, p. 2166-2173, 2005.

OLIVEIRA, J.C.; SANTOS, I.N., **A Proposal of Methodology for the Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions Using the Superposition Principle**. Revista IEEE América Latina, v. 12, p. 1418-1423, 2014.

OLIVEIRA, J.C.; SANTOS, A. C.; SANTOS, I.N.; TAVARES, C.E., **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.

OLIVEIRA, J.C.; SANTOS, I. N.; SILVA, S. F. P., **Critical Evaluation of the Performance of the Method of Harmonic Power Flow to Determine the Dominant Source of Distortion**, IEEE Latin America Transactions, Vol. 9, No. 5, pp 740-746, September, 2011.

OLIVEIRA, J.C.; SANTOS, I.N.; SILVA, S.F.P., **Uma Análise Crítica das Principais Propostas Para Atribuição de Responsabilidade na Questão das Distorções Harmônicas**. Trabalho apresentado no XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, **Procedimentos de Rede - Submódulo 2.2 - Verificação da conformidade das instalações da rede básica aos requisitos mínimos**. Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, A. C., **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.

SANTOS, I. N., **Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas**. Tese (Doutorado). – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, I. N., **Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos Para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SRINIVASAN, K., **On separating customer and supply side harmonic contributions**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, April 1996.

SRINIVASAN, K.; JUTRAS, R., **Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.

SWART, P. H.; CASE, M. J.; Van WYK, J. D., **On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks**. European Transactions Electric Power, v. 6, n. 6, p. 391-396, 1996.

TANAL, T.; AKAGI, H., **A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits**. IEEE Transactions Power Delivery, v. 10, n. 4, p. 1737-1742, 1995.

XU, W.; LIU, X.; LIU, Y., **An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination**. IEEE Transactions. Power Delivery, v. 18, n. 1, p. 214-219, 2003.

XU, W.; LIU, Y., **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.

**APÊNDICE A – QUADROS DE GRANDEZAS MEDIDAS E CALCULADAS ATÉ 30ª
ORDEM HARMÔNICA**

**QUADRO 22 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE
CAPACITORES CONECTADO**

Ordem h	I _{pac-h}					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	7,78	-7,40	8,08	-246,11	7,78	-124,74
2	0,02	-8,48	0,01	-166,57	0,01	-225,16
3	0,37	29,41	0,30	-75,07	0,41	-196,40
4	0,01	26,03	0,02	-106,37	0,02	-236,68
5	4,19	137,54	3,86	-351,69	3,52	-104,44
6	0,02	139,79	0,02	-55,40	0,02	-62,64
7	1,74	-68,29	1,39	-321,02	1,90	-201,95
8	0,02	-50,85	0,01	-269,53	0,01	-202,04
9	0,20	-149,87	0,17	-133,18	0,37	37,29
10	0,01	-101,11	0,01	-147,71	0,01	25,39
11	0,54	-47,90	0,49	-190,95	0,33	-294,12
12	0,00	47,42	0,00	-106,49	0,00	-166,21
13	0,34	65,52	0,29	-189,72	0,39	-66,66
14	0,00	84,66	0,00	-98,36	0,00	-145,20
15	0,06	16,93	0,11	-8,62	0,17	-179,61
16	0,00	-65,36	0,00	-87,32	0,00	-224,50
17	0,27	118,61	0,19	-32,76	0,14	-106,81
18	0,00	-23,45	0,00	-156,44	0,00	-252,18
19	0,10	-142,75	0,09	-57,28	0,15	-281,56
20	0,00	51,74	0,00	-98,26	0,00	-118,25
21	0,04	-159,13	0,08	-224,55	0,11	-24,93
22	0,00	88,82	0,00	-101,61	0,00	-89,61
23	0,15	-87,07	0,09	-245,91	0,07	-293,77
24	0,00	-128,53	0,00	-304,57	0,00	-30,05
25	0,03	-4,35	0,05	-302,02	0,07	-146,21
26	0,00	-19,15	0,00	-245,89	0,00	-122,32
27	0,03	8,61	0,06	-77,55	0,07	-232,36
28	0,00	-92,05	0,00	-216,15	0,00	-247,33
29	0,10	56,68	0,04	-112,20	0,05	-132,99
30	0,00	29,93	0,00	-178,66	0,00	-93,20

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 23 – VALORES DE CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO

Ordem h	I _{pac-h}					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	7,67	-6,98	7,84	-245,66	7,60	-125,30
2	0,02	-10,58	0,02	-177,01	0,01	-211,92
3	0,36	25,11	0,39	-73,26	0,49	-207,64
4	0,03	-35,26	0,04	-155,44	0,03	-229,28
5	4,22	139,66	3,96	-350,12	3,54	-102,65
6	0,04	128,70	0,02	-93,56	0,03	-23,83
7	1,78	-61,94	1,42	-316,02	1,98	-196,61
8	0,01	-36,45	0,01	-70,11	0,01	-191,97
9	0,23	-148,91	0,16	-122,36	0,38	41,47
10	0,01	-144,33	0,01	-32,79	0,01	-274,91
11	0,52	-48,31	0,50	-192,49	0,32	-299,86
12	0,01	-69,70	0,01	-243,73	0,01	-249,87
13	0,35	73,51	0,30	-180,65	0,40	-58,39
14	0,01	-19,80	0,01	-184,62	0,01	10,67
15	0,08	11,50	0,10	-7,74	0,17	-176,85
16	0,01	47,82	0,00	-164,74	0,00	-113,71
17	0,25	120,26	0,20	-33,70	0,11	-112,20
18	0,01	105,06	0,00	-42,14	0,00	-107,58
19	0,11	-129,76	0,09	-40,49	0,15	-268,48
20	0,00	134,40	0,01	-24,95	0,00	-195,52
21	0,05	-170,61	0,07	-221,10	0,11	-22,60
22	0,00	-122,27	0,00	-240,21	0,00	34,63
23	0,14	-85,01	0,10	-246,15	0,06	-283,20
24	0,00	-85,68	0,00	-211,53	0,00	-23,96
25	0,04	22,18	0,04	-281,00	0,07	-127,49
26	0,00	-80,29	0,00	-234,17	0,00	-28,84
27	0,03	-6,53	0,05	-75,30	0,07	-229,93
28	0,00	46,44	0,00	-55,28	0,00	-179,11
29	0,09	61,92	0,06	-106,28	0,04	-135,90
30	0,00	53,98	0,00	-93,92	0,00	-151,24

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 24 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE ANTES E APÓS A INSERÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Ordem h	EP Ian (%)	EP Ibn (%)	EP Icn (%)	EMPA (%)
1	1,41	3,01	2,33	2,25
2	35,76	55,35	2,03	31,04
3	2,01	30,00	18,82	16,94
4	98,19	71,19	86,77	85,38
5	0,81	2,58	0,78	1,39
6	60,47	44,45	72,64	59,19
7	1,95	2,32	4,07	2,78
8	35,20	41,52	24,69	33,80
9	12,71	5,75	2,71	7,06
10	119,41	77,98	82,21	93,20
11	4,71	2,41	4,52	3,88
12	158,63	36,24	95,76	96,88
13	3,04	4,35	2,74	3,37
14	123,89	178,78	61,34	121,34
15	17,73	9,23	2,02	9,66
16	93,16	22,07	67,06	60,76
17	6,60	3,94	15,38	8,64
18	117,73	76,43	51,33	81,83
19	2,60	1,85	2,30	2,25
20	132,40	205,02	47,89	128,44
21	15,44	9,08	3,43	9,31
22	20,78	2,25	60,67	27,90
23	6,19	15,91	24,72	15,61
24	41,88	38,65	61,04	47,19
25	5,06	21,01	8,60	11,56
26	21,35	57,75	21,79	33,63
27	14,87	10,12	6,27	10,42
28	9,45	5,64	5,64	6,91
29	8,52	22,50	29,74	20,25
30	13,53	12,36	24,16	16,68

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 25 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES CONECTADO

Ordem h	lan	lbn	lcn
	DII (%)	DII (%)	DII (%)
1	100,00	100,00	100,00
2	0,24	0,18	0,14
3	4,72	3,69	5,27
4	0,18	0,26	0,22
5	53,80	47,79	45,19
6	0,31	0,19	0,22
7	22,42	17,20	24,45
8	0,19	0,13	0,15
9	2,60	2,08	4,81
10	0,06	0,07	0,07
11	6,96	6,06	4,29
12	0,06	0,05	0,06
13	4,40	3,61	5,06
14	0,04	0,05	0,05
15	0,82	1,31	2,17
16	0,04	0,04	0,03
17	3,49	2,39	1,74
18	0,04	0,03	0,04
19	1,34	1,17	1,91
20	0,03	0,03	0,03
21	0,51	1,01	1,37
22	0,04	0,02	0,02
23	1,93	1,08	0,94
24	0,04	0,03	0,03
25	0,43	0,61	0,93
26	0,02	0,03	0,03
27	0,37	0,72	0,89
28	0,04	0,04	0,03
29	1,29	0,56	0,71
30	0,03	0,02	0,02

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 26 – VALORES DE DII% DAS CORRENTES VERIFICADAS NO PAC COM O BANCO DE CAPACITORES DESCONECTADO

Ordem h	lan	lbn	lcn
	DII (%)	DII (%)	DII (%)
1	100,00	100,00	100,00
2	0,33	0,29	0,14
3	4,70	4,94	6,41
4	0,36	0,45	0,43
5	55,01	50,54	46,63
6	0,50	0,28	0,38
7	23,18	18,15	26,05
8	0,13	0,19	0,20
9	2,98	2,03	5,06
10	0,14	0,12	0,13
11	6,73	6,40	4,20
12	0,16	0,07	0,13
13	4,60	3,89	5,33
14	0,10	0,15	0,08
15	0,98	1,23	2,27
16	0,09	0,05	0,06
17	3,30	2,56	1,51
18	0,10	0,06	0,06
19	1,40	1,19	1,91
20	0,06	0,09	0,05
21	0,59	0,95	1,45
22	0,04	0,02	0,04
23	1,84	1,29	0,73
24	0,05	0,04	0,04
25	0,46	0,49	0,87
26	0,03	0,04	0,04
27	0,44	0,67	0,97
28	0,04	0,04	0,03
29	1,19	0,70	0,51
30	0,03	0,02	0,03

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 27 – VALORES DAS TENSÕES DE FASE VERIFICADAS DURANTE O MONITORAMENTO DA FONTE DE TENSÃO ISENTA DE CARGA

Ordem h	Vs-h					
	Van		Vbn		Vcn	
	Módulo (V)	Ângulo (°)	Módulo (V)	Ângulo (°)	Módulo (V)	Ângulo (°)
1	126,40	0,00	126,78	-120,21	126,10	-240,11
2	0,10	80,01	0,07	-22,48	0,09	-85,83
3	0,92	175,30	0,16	-95,61	1,10	-217,29
4	0,05	82,68	0,08	-54,39	0,03	-199,82
5	1,41	12,55	1,46	-230,81	1,44	-109,41
6	0,04	19,44	0,03	-51,77	0,04	-181,88
7	0,32	114,29	0,45	32,24	0,51	-104,45
8	0,03	-17,00	0,01	-165,34	0,03	-235,66
9	0,07	-57,88	0,04	-91,31	0,05	-229,23
10	0,03	-66,01	0,04	-252,05	0,01	-87,01
11	0,37	-0,49	0,44	-222,13	0,29	-97,62
12	0,06	-109,43	0,09	-189,28	0,09	-342,83
13	0,08	51,96	0,03	2,61	0,08	-141,36
14	0,01	42,03	0,01	-248,43	0,01	-99,54
15	0,01	-100,55	0,07	2,23	0,05	-168,13
16	0,02	3,00	0,01	-204,47	0,01	-163,02
17	0,14	-164,05	0,11	-66,91	0,16	-300,60
18	0,01	29,53	0,01	-39,52	0,01	-179,72
19	0,02	-93,80	0,02	-7,97	0,03	-173,33
20	0,01	-6,60	0,01	-85,53	0,01	-240,37
21	0,03	2,53	0,03	-208,44	0,03	-23,90
22	0,01	-109,90	0,01	-67,93	0,01	-246,85
23	0,04	162,95	0,02	-2,71	0,02	-30,48
24	0,00	-80,83	0,01	-200,20	0,01	-191,08
25	0,03	103,19	0,02	30,78	0,05	-110,45
26	0,01	-74,62	0,01	-233,16	0,00	-257,60
27	0,01	-154,44	0,01	-89,77	0,03	-303,90
28	0,01	-92,83	0,03	-200,28	0,02	-82,62
29	0,05	88,14	0,04	-83,27	0,01	-134,27
30	0,01	-60,12	0,01	-248,49	0,01	-131,52

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 28 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO SUPRIDOR OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES ORIUNDOS DO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO À MONTANTE DO PAC

Ordem h	Zs-h					
	Zan		Zbn		Zcn	
	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)	Módulo (Ω)	Ângulo (°)
1	0,14	48,80	0,15	41,93	0,11	39,08
2	0,23	66,36	0,23	60,90	0,17	58,38
3	0,32	73,73	0,33	69,64	0,24	67,69
4	0,42	77,65	0,42	74,45	0,31	72,89
5	0,52	80,07	0,52	77,45	0,38	76,17
6	0,63	81,70	0,62	79,49	0,46	78,40
7	0,73	82,87	0,72	80,96	0,53	80,02
8	0,83	83,75	0,82	82,08	0,61	81,25
9	0,93	84,44	0,92	82,95	0,68	82,21
10	1,04	85,00	1,02	83,65	0,76	82,98
11	1,14	85,45	1,12	84,22	0,83	83,61
12	1,24	85,83	1,22	84,70	0,91	84,14
13	1,35	86,15	1,33	85,11	0,98	84,59
14	1,45	86,42	1,43	85,45	1,06	84,97
15	1,55	86,66	1,53	85,76	1,13	85,31
16	1,66	86,87	1,63	86,02	1,21	85,60
17	1,76	87,05	1,73	86,25	1,28	85,86
18	1,86	87,22	1,83	86,46	1,36	86,09
19	1,97	87,36	1,93	86,65	1,43	86,29
20	2,07	87,49	2,04	86,81	1,51	86,48
21	2,17	87,61	2,14	86,97	1,58	86,64
22	2,27	87,72	2,24	87,10	1,66	86,80
23	2,38	87,82	2,34	87,23	1,73	86,94
24	2,48	87,91	2,44	87,34	1,81	87,06
25	2,58	87,99	2,54	87,45	1,88	87,18
26	2,69	88,07	2,64	87,55	1,96	87,29
27	2,79	88,14	2,75	87,64	2,03	87,39
28	2,89	88,21	2,85	87,72	2,11	87,48
29	3,00	88,27	2,95	87,80	2,18	87,57
30	3,10	88,33	3,05	87,87	2,26	87,65

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 29 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS APÓS A CONVERSÃO DAS TENSÕES DE THÉVENIN EM CORRENTES DE NORTON

Ordem h	Is-h					
	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	926,28	-48,80	840,85	77,56	1211,54	-158,93
2	0,50	-21,05	0,30	73,02	0,61	144,33
3	2,97	101,02	0,47	104,86	4,61	82,81
4	0,13	-10,77	0,23	93,40	0,28	-125,99
5	16,28	-43,82	20,16	-176,59	20,06	61,88
6	0,08	-9,31	0,08	-157,89	0,08	127,43
7	6,19	121,94	6,69	-146,08	8,97	-17,45
8	0,04	-149,39	0,05	140,71	0,06	15,05
9	0,38	21,15	0,87	38,73	1,80	-143,87
10	0,02	-38,58	0,04	-32,92	0,04	126,53
11	1,49	126,84	1,74	-28,18	1,01	-146,12
12	0,05	170,42	0,08	92,45	0,10	-93,37
13	0,91	-124,66	1,12	-18,90	1,66	118,13
14	0,01	-161,35	0,02	-15,00	0,02	67,65
15	0,08	170,42	0,48	167,67	0,76	-9,25
16	0,01	-43,35	0,02	106,06	0,01	-110,27
17	0,77	-75,87	0,77	122,77	0,34	26,09
18	0,01	-85,72	0,01	151,83	0,02	85,76
19	0,27	22,41	0,38	99,84	0,68	-109,82
20	0,01	-63,09	0,01	97,06	0,01	-142,40
21	0,12	21,92	0,38	-66,38	0,54	133,76
22	0,01	-89,01	0,01	-0,15	0,01	114,42
23	0,58	68,71	0,47	-96,13	0,24	-155,01
24	0,01	29,61	0,01	106,52	0,01	-107,95
25	0,09	146,19	0,27	-154,17	0,45	13,41
26	0,01	161,73	0,01	170,20	0,01	38,12
27	0,16	-175,02	0,38	64,64	0,45	-87,36
28	0,01	-122,77	0,02	65,25	0,01	-137,77
29	0,47	-153,71	0,33	21,96	0,18	36,73
30	0,01	-177,02	0,01	-8,99	0,01	109,21

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 30 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Ordem h	Is-h					
	Ian		Ibn		Icn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	932,13	-48,48	847,37	77,88	1217,99	-158,72
2	0,51	-20,60	0,29	75,48	0,62	144,16
3	3,11	94,58	0,17	104,72	4,69	87,76
4	0,14	-7,36	0,21	95,28	0,28	-129,35
5	12,10	-44,30	16,31	-177,75	16,66	59,02
6	0,06	3,02	0,08	-147,44	0,06	130,05
7	4,48	125,90	5,31	-147,40	7,08	-16,24
8	0,04	-126,46	0,05	131,91	0,05	23,10
9	0,18	11,07	0,70	36,79	1,42	-144,17
10	0,02	-49,86	0,04	-40,97	0,04	118,11
11	0,96	123,85	1,28	-34,68	0,74	-159,90
12	0,04	165,08	0,07	93,46	0,10	-96,05
13	0,57	-130,71	0,83	-22,12	1,27	119,62
14	0,01	179,57	0,02	-26,58	0,02	73,77
15	0,04	119,02	0,38	166,63	0,60	-11,97
16	0,02	-48,28	0,01	109,16	0,01	-122,81
17	0,51	-83,45	0,60	115,09	0,27	4,17
18	0,01	-72,44	0,01	162,02	0,02	88,92
19	0,17	13,46	0,29	92,59	0,53	-112,12
20	0,01	-51,35	0,01	100,22	0,01	-138,31
21	0,08	22,46	0,30	-72,13	0,44	128,71
22	0,01	-87,95	0,01	-12,73	0,01	118,54
23	0,45	60,78	0,39	-102,51	0,20	-169,32
24	0,01	20,33	0,01	96,91	0,01	-99,03
25	0,06	130,33	0,23	-160,60	0,38	9,57
26	0,01	161,95	0,01	161,91	0,01	34,43
27	0,13	-175,82	0,33	58,46	0,39	-93,12
28	0,02	-116,66	0,02	75,84	0,01	-150,75
29	0,38	-161,30	0,30	15,82	0,13	32,44
30	0,01	176,83	0,01	-10,84	0,01	113,18

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 31 – COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE CORRENTE OBTIDOS POR MÉTODOS DISTINTOS

Ordem h	EP Ian (%)	EP Ibn (%)	EP Icn (%)
1	0,63	0,77	0,53
2	3,49	2,43	1,77
3	4,36	171,21	1,77
4	8,13	9,06	2,05
5	34,61	23,58	20,39
6	33,38	2,36	25,59
7	38,07	26,07	26,79
8	2,05	13,90	17,54
9	109,25	23,81	26,31
10	12,10	5,48	1,80
11	56,34	35,87	35,26
12	5,61	5,11	1,56
13	58,14	34,56	30,88
14	28,17	27,25	14,79
15	30,29	29,28	15,88
16	32,35	31,35	16,97
17	34,50	20,59	18,14
18	36,53	21,48	19,38
19	36,67	21,32	19,30
20	36,93	22,77	18,81
21	36,84	22,52	18,20
22	39,52	23,18	18,25
23	34,15	23,14	17,63
24	35,85	24,49	18,85
25	34,27	23,62	17,59
26	36,48	25,04	18,82
27	34,81	24,31	17,89
28	35,32	24,08	18,13
29	35,71	23,68	18,30
30	35,97	23,10	18,41
Média	32,02	25,51	16,59

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 32 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DE CONCEITOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Ordem h	Ic-h					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	77,35	-80,22	45,25	92,96	26,10	178,50
2	0,04	127,94	0,04	52,31	0,02	-85,56
3	0,33	129,88	0,24	106,26	0,71	-63,48
4	0,02	56,31	0,02	-151,79	0,03	-169,41
5	6,98	15,10	11,10	-140,60	5,72	107,55
6	0,04	-109,33	0,01	89,32	0,01	166,19
7	2,34	107,36	1,52	-51,76	1,68	77,64
8	0,02	150,83	0,03	-155,19	0,01	-79,36
9	0,06	111,44	0,15	99,79	0,53	-91,48
10	0,01	80,36	0,01	93,77	0,01	-34,14
11	0,64	125,25	1,03	-31,82	0,29	-175,52
12	0,00	84,40	0,01	3,89	0,16	-9,07
13	0,37	-54,84	0,37	51,20	0,45	175,94
14	0,01	-110,84	0,07	142,15	0,01	-77,67
15	0,02	-141,54	0,13	179,70	0,31	17,54
16	0,01	161,99	0,00	-17,51	0,00	10,79
17	0,36	-59,61	0,44	142,89	0,08	21,34
18	0,02	-169,93	0,02	-43,25	0,01	-7,77
19	0,12	90,85	0,11	164,16	0,18	-59,61
20	0,07	-161,38	0,01	-123,03	0,00	23,82
21	0,07	-27,36	0,12	-39,37	0,20	165,66
22	0,00	166,54	0,00	22,02	0,00	-69,39
23	0,24	94,27	0,16	-42,80	0,05	-112,06
24	0,01	-168,89	0,00	-72,60	0,00	130,03
25	0,04	-131,61	0,06	-96,75	0,09	65,15
26	0,00	99,08	0,00	-52,14	0,00	-170,97
27	0,06	161,62	0,10	101,63	0,14	-43,97
28	0,01	162,71	0,00	-169,72	0,00	-15,91
29	0,16	-116,47	0,12	81,55	0,04	35,16
30	0,01	-103,61	0,00	112,22	0,01	-23,07

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 33 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DA CARGA SUPRIDA PELO CIRCUITO RETIFICADOR

Ordem h	$Z_{carga-h}$					
	Z_{an}		Z_{bn}		Z_{cn}	
	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)
1	1,58	74,94	2,41	98,81	4,12	1,31
2	3,40	-61,27	2,40	64,02	6,24	-36,57
3	2,12	98,70	2,61	-105,57	2,11	-111,86
4	1,64	24,36	2,54	-58,01	2,03	133,71
5	1,45	-11,80	1,30	21,40	2,33	-112,34
6	1,33	-142,11	6,27	-92,76	3,02	-47,23
7	6,55	73,58	2,44	-34,99	1,79	-68,49
8	4,06	91,98	1,50	41,69	3,08	-135,66
9	1,81	-77,81	6,05	-114,18	2,98	35,16
10	5,09	-35,48	4,52	-68,52	2,37	-140,58
11	10,55	30,61	3,01	36,00	2,59	173,54
12	6,58	-179,11	7,50	-178,07	0,56	5,81
13	3,66	-32,39	4,68	-50,72	3,86	-75,60
14	1,79	47,30	0,44	-72,81	3,33	-113,20
15	3,20	-100,34	13,56	103,85	4,91	33,51
16	2,80	-142,41	9,76	-78,49	6,01	-81,52
17	9,86	-79,18	4,49	75,21	4,05	-163,69
18	1,05	163,44	1,25	-74,04	2,73	155,65
19	5,73	36,08	12,33	-34,84	8,56	-136,07
20	0,27	172,67	2,53	-72,21	10,48	-1,14
21	4,50	-169,52	11,18	-60,04	6,42	47,89
22	4,24	-150,28	7,54	120,27	5,53	-85,20
23	8,48	79,45	9,29	-156,37	24,42	-156,58
24	3,46	-82,25	10,57	-120,84	12,41	-144,46
25	9,88	-38,71	19,53	36,34	13,65	28,63
26	21,30	162,41	28,19	-53,75	13,67	-132,05
27	6,83	149,77	10,34	85,52	7,71	59,70
28	4,27	143,92	7,26	-27,57	33,91	-129,28
29	9,48	53,32	8,47	77,32	18,31	-163,99
30	6,35	86,33	28,65	43,20	5,94	-128,78

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 34 – VALORES DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS TOTAIS DA CARGA

Ordem h	$Z_{tot-carga-h}$					
	Zan		Zbn		Zcn	
	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)	Módulo (Ω)	Ângulo ($^\circ$)
1	1,59	74,88	2,42	23,39	4,15	49,55
2	3,35	-60,31	2,42	63,03	6,11	-46,19
3	2,15	99,05	2,57	-105,15	2,08	-111,35
4	1,65	22,85	2,48	-62,24	2,06	138,43
5	1,45	-15,58	1,30	27,09	2,32	-3,74
6	1,32	-140,59	5,75	-91,15	2,93	-48,91
7	7,31	109,82	2,36	-56,19	1,74	-58,27
8	4,41	91,61	1,53	41,08	2,95	-130,46
9	1,74	-87,43	5,54	-47,23	2,94	-14,69
10	4,77	-35,64	4,09	-73,98	2,29	-138,81
11	14,12	119,45	3,26	104,79	2,60	178,88
12	6,46	-168,96	7,39	-169,77	0,56	0,52
13	3,42	-39,54	4,36	-33,64	3,69	-25,53
14	1,87	42,41	0,44	-74,93	3,00	-103,28
15	2,88	-108,36	22,93	45,31	5,59	39,72
16	2,62	-138,37	7,13	-98,86	4,89	-83,10
17	15,92	65,14	5,43	69,57	4,07	-176,62
18	1,06	165,95	1,19	-69,28	2,85	160,75
19	5,09	-34,62	10,00	-37,04	8,07	-19,53
20	0,27	-173,36	2,30	-57,80	9,24	-28,19
21	4,80	170,61	22,13	48,26	8,57	43,36
22	3,72	-136,24	11,32	131,56	4,29	-81,56
23	14,98	60,09	12,19	11,48	16,54	-131,12
24	2,88	-87,16	7,79	-132,83	9,02	-134,51
25	7,10	-51,33	29,24	-31,72	16,91	-14,20
26	15,23	-132,87	12,94	-63,18	7,37	-91,09
27	11,02	130,55	27,12	51,92	12,46	36,11
28	5,51	134,72	7,12	-16,26	11,24	-104,89
29	21,74	40,32	13,42	19,76	27,35	-140,84
30	6,91	-3,56	11,66	-66,44	4,47	-123,24

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 35 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR

Ordem h	$I_{s-pac-h}$					
	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	74,66	-72,55	50,28	95,34	30,45	-168,93
2	0,04	102,85	0,03	73,54	0,02	-112,80
3	0,41	72,49	0,03	-81,24	0,61	-93,33
4	0,03	37,10	0,04	-135,61	0,04	172,47
5	4,26	30,82	5,04	-141,15	2,64	129,94
6	0,04	-108,36	0,01	22,08	0,01	-110,47
7	0,41	101,33	2,02	-25,25	2,71	107,31
8	0,01	-133,07	0,02	158,84	0,01	-117,72
9	0,20	173,79	0,13	158,86	0,33	-60,59
10	0,01	58,90	0,01	109,60	0,02	-3,81
11	0,07	92,27	0,33	-50,03	0,23	123,01
12	0,01	70,94	0,01	-2,58	0,08	-66,14
13	0,27	-27,53	0,28	79,28	0,36	-145,63
14	0,00	-155,49	0,03	-18,36	0,01	-93,55
15	0,04	-29,75	0,02	-155,28	0,11	26,41
16	0,01	-144,07	0,00	-64,52	0,00	42,24
17	0,05	-63,69	0,15	127,76	0,08	-75,33
18	0,01	-99,08	0,02	-164,67	0,01	36,40
19	0,08	113,08	0,06	-153,94	0,10	-16,47
20	0,01	-58,90	0,02	-176,76	0,00	-32,69
21	0,03	-37,51	0,03	-36,64	0,07	165,63
22	0,01	173,25	0,00	-50,27	0,01	-80,25
23	0,06	84,80	0,07	-36,83	0,02	52,76
24	0,04	167,87	0,00	-28,03	0,00	131,43
25	0,03	-108,49	0,02	-45,96	0,04	104,59
26	0,00	30,49	0,00	-54,29	0,00	-147,78
27	0,03	149,96	0,03	91,05	0,06	-48,43
28	0,01	-147,53	0,01	156,59	0,00	44,43
29	0,05	-118,71	0,06	73,20	0,01	-95,54
30	0,00	-115,74	0,00	135,04	0,01	-11,30

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 36 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DE CORRENTES HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR

Ordem h	$I_{c-pac-h}$					
	I _{an}		I _{bn}		I _{cn}	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	71,74	-78,20	42,70	91,88	25,45	178,76
2	0,05	124,73	0,04	52,50	0,02	-87,09
3	0,29	133,11	0,27	105,50	0,81	-63,60
4	0,02	45,96	0,03	-159,36	0,03	-162,05
5	6,78	-5,44	8,59	-154,36	5,49	98,57
6	0,05	-82,99	0,02	88,19	0,01	158,36
7	2,15	109,74	1,89	-66,76	2,11	62,89
8	0,02	152,07	0,02	-169,26	0,02	-71,89
9	0,13	102,29	0,17	91,69	0,53	-104,79
10	0,01	68,48	0,01	86,72	0,01	-17,85
11	0,60	127,67	0,78	-26,59	0,29	-157,35
12	0,00	95,47	0,01	13,38	0,08	-62,77
13	0,45	-77,34	0,41	33,85	0,48	160,57
14	0,01	-129,92	0,03	-10,01	0,01	-73,24
15	0,05	-125,33	0,13	177,34	0,27	10,32
16	0,01	-159,04	0,00	-16,07	0,00	7,14
17	0,32	-61,76	0,33	138,88	0,08	39,37
18	0,01	-117,84	0,02	-165,68	0,01	14,38
19	0,14	68,48	0,12	153,95	0,18	-69,78
20	0,01	-69,78	0,02	175,38	0,00	14,79
21	0,06	-4,33	0,11	-42,58	0,18	159,29
22	0,01	-156,23	0,00	28,94	0,00	-76,53
23	0,21	90,56	0,15	-52,86	0,05	-108,04
24	0,03	163,59	0,00	-57,71	0,01	138,92
25	0,05	-149,77	0,06	-101,28	0,10	58,79
26	0,00	106,68	0,01	-59,07	0,00	-171,55
27	0,05	169,81	0,09	98,50	0,13	-50,56
28	0,01	178,35	0,00	167,05	0,00	-13,09
29	0,15	-121,82	0,10	70,89	0,05	38,76
30	0,01	-128,07	0,00	103,78	0,01	1,57

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 37 – VALORES DAS CORRENTES HARMÔNICAS TOTAIS NO PAC OBTIDAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA LEI DE KIRCHOFF DOS NÓS

Ordem h	I_{pac-h}					
	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	7,78	-7,40	8,08	113,89	7,78	- -124,74
2	0,02	-8,48	0,01	-166,57	0,01	134,84
3	0,37	29,41	0,30	-75,07	0,41	163,60
4	0,01	26,03	0,02	-106,37	0,02	123,32
5	4,19	137,54	3,86	8,31	3,52	-104,44
6	0,02	139,79	0,02	-55,40	0,02	-62,64
7	1,74	-68,29	1,39	38,98	1,90	158,05
8	0,02	-50,85	0,01	90,47	0,01	157,96
9	0,20	-149,87	0,17	-133,18	0,37	37,29
10	0,01	-101,11	0,01	-147,71	0,01	25,39
11	0,54	-47,90	0,49	169,05	0,33	65,88
12	0,00	47,42	0,00	-106,49	0,00	-166,21
13	0,34	65,52	0,29	170,28	0,39	-66,66
14	0,00	84,66	0,00	-98,36	0,00	-145,20
15	0,06	16,93	0,11	-8,62	0,17	-179,61
16	0,00	-65,36	0,00	-87,32	0,00	135,50
17	0,27	118,61	0,19	-32,76	0,14	-106,81
18	0,00	-23,45	0,00	-156,44	0,00	107,82
19	0,10	-142,75	0,09	-57,28	0,15	78,44
20	0,00	51,74	0,00	-98,26	0,00	-118,25
21	0,04	-159,13	0,08	135,45	0,11	-24,93
22	0,00	88,82	0,00	-101,61	0,00	-89,61
23	0,15	-87,07	0,09	114,09	0,07	66,23
24	0,00	-128,53	0,00	55,43	0,00	-30,05
25	0,03	-4,35	0,05	57,98	0,07	-146,21
26	0,00	-19,15	0,00	114,11	0,00	-122,32
27	0,03	8,61	0,06	-77,55	0,07	127,64
28	0,00	-92,05	0,00	143,85	0,00	112,67
29	0,10	56,68	0,04	-112,20	0,05	-132,99
30	0,00	29,93	0,00	-178,66	0,00	-93,20

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 38 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA FONTE SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC

Ordem h	$I_{s-proj-pac-h}$					
	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	9,59	-65,15	6,22	-18,56	3,91	-44,19
2	1,96	111,33	1,76	-119,89	1,54	112,36
3	1,11	43,07	0,08	-6,18	1,48	103,07
4	2,21	11,07	1,98	-29,24	2,24	49,15
5	1,02	-106,72	1,30	-149,46	0,75	-125,62
6	1,59	111,85	0,65	77,48	0,66	-47,83
7	0,23	169,62	1,45	-64,23	1,42	-50,74
8	0,40	-82,22	1,86	68,38	1,07	84,32
9	1,00	-36,34	0,77	-67,96	0,88	-97,88
10	1,09	160,00	2,09	-102,69	2,82	-29,20
11	0,13	140,17	0,68	140,93	0,70	57,13
12	1,79	23,52	3,15	103,91	16,55	100,06
13	0,79	-93,05	0,97	-91,00	0,91	-78,97
14	1,31	119,85	6,88	80,00	2,74	51,66
15	0,61	-46,68	0,23	-146,66	0,62	-153,99
16	3,86	-78,71	1,27	22,81	1,36	-93,27
17	0,19	177,70	0,75	160,52	0,61	31,48
18	3,10	-75,62	9,12	-8,23	2,66	-71,42
19	0,74	-104,18	0,66	-96,66	0,66	-94,91
20	4,52	-110,64	7,30	-78,50	0,99	85,57
21	0,78	121,63	0,33	-172,09	0,67	-169,44
22	1,79	84,43	0,77	51,34	3,49	9,37
23	0,41	171,87	0,82	-150,92	0,30	-13,47
24	12,40	-63,59	1,86	-83,46	1,47	161,49
25	0,86	-104,14	0,43	-103,94	0,59	-109,20
26	0,83	49,64	1,42	-168,41	1,88	-25,46
27	0,95	141,36	0,53	168,60	0,84	-176,07
28	1,78	-55,48	2,17	12,74	0,96	-68,24
29	0,48	-175,38	1,34	-174,60	0,20	37,44
30	1,75	-145,67	1,88	-46,30	4,47	81,90

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 39 – VALORES DAS PROJEÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DA CARGA SOBRE A CORRENTE TOTAL NO PAC

Ordem h	$I_{c-proj-pac-h}$					
	lan		lbn		lcn	
	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)	Módulo (A)	Ângulo (°)
1	9,22	-70,80	5,28	-22,01	3,27	-56,50
2	2,50	133,21	2,41	-140,93	2,13	138,07
3	0,78	103,70	0,92	-179,43	1,96	132,80
4	1,25	19,93	1,21	-52,99	1,76	74,63
5	1,62	-142,98	2,22	-162,67	1,56	-156,99
6	2,17	137,22	1,07	143,59	0,74	-139,00
7	1,23	178,03	1,36	-105,74	1,11	-95,15
8	1,03	-157,07	1,76	100,27	1,39	130,15
9	0,62	-107,85	1,01	-135,13	1,42	-142,08
10	2,05	169,59	2,51	-125,58	2,01	-43,24
11	1,11	175,57	1,58	164,36	0,85	136,77
12	0,96	48,05	3,53	119,86	16,76	103,43
13	1,31	-142,87	1,40	-136,43	1,22	-132,77
14	2,01	145,43	6,78	88,35	2,26	71,96
15	0,73	-142,27	1,19	-174,04	1,58	-170,07
16	3,80	-93,68	0,52	71,25	1,74	-128,36
17	1,19	179,63	1,73	171,64	0,57	146,19
18	3,01	-94,38	8,13	-9,24	2,53	-93,44
19	1,38	-148,77	1,26	-148,77	1,24	-148,22
20	4,96	-121,52	7,17	-86,36	1,35	133,04
21	1,56	154,81	1,33	-178,03	1,66	-175,77
22	1,96	114,95	0,79	130,55	2,51	13,09
23	1,41	177,62	1,76	-166,95	0,71	-174,27
24	11,99	-67,88	2,01	-113,15	2,44	168,97
25	1,47	-145,42	1,18	-159,26	1,32	-155,00
26	0,78	125,83	2,41	-173,19	1,07	-49,23
27	1,84	161,21	1,52	176,05	1,84	-178,21
28	1,47	-89,60	1,21	23,20	1,10	-125,76
29	1,48	-178,50	2,34	-176,91	0,85	171,75
30	2,64	-158,00	1,39	-77,56	4,45	94,77

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 40 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC

Ordem h	I_{pac-h}					
	lan		lbn		lcn	
	Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga
1	51,00%	49,00%	54,08%	45,92%	54,47%	45,53%
2	43,90%	56,10%	42,09%	57,91%	41,95%	58,05%
3	58,72%	41,28%	8,45%	91,55%	42,96%	57,04%
4	63,97%	36,03%	62,04%	37,96%	56,04%	43,96%
5	38,60%	61,40%	36,96%	63,04%	32,47%	67,53%
6	42,26%	57,74%	37,81%	62,19%	46,95%	53,05%
7	16,02%	83,98%	51,66%	48,34%	56,26%	43,74%
8	28,22%	71,78%	51,42%	48,58%	43,44%	56,56%
9	61,63%	38,37%	43,22%	56,78%	38,29%	61,71%
10	34,58%	65,42%	45,47%	54,53%	58,41%	41,59%
11	10,76%	89,24%	29,96%	70,04%	44,92%	55,08%
12	65,08%	34,92%	47,19%	52,81%	49,69%	50,31%
13	37,68%	62,32%	40,80%	59,20%	42,79%	57,21%
14	39,55%	60,45%	50,37%	49,63%	54,80%	45,20%
15	45,68%	54,32%	15,88%	84,12%	28,22%	71,78%
16	50,44%	49,56%	70,95%	29,05%	43,99%	56,01%
17	13,75%	86,25%	30,37%	69,63%	51,59%	48,41%
18	50,72%	49,28%	52,87%	47,13%	51,29%	48,71%
19	34,84%	65,16%	34,30%	65,70%	34,58%	65,42%
20	47,67%	52,33%	50,46%	49,54%	42,30%	57,70%
21	33,33%	66,67%	20,00%	80,00%	28,68%	71,32%
22	47,67%	52,33%	49,32%	50,68%	58,19%	41,81%
23	22,66%	77,34%	31,72%	68,28%	30,01%	69,99%
24	50,84%	49,16%	48,07%	51,93%	37,59%	62,41%
25	36,92%	63,08%	26,73%	73,27%	30,91%	69,09%
26	51,55%	48,45%	37,11%	62,89%	63,79%	36,21%
27	34,03%	65,97%	25,84%	74,16%	31,36%	68,64%
28	54,83%	45,17%	64,11%	35,89%	46,63%	53,37%
29	24,53%	75,47%	36,43%	63,57%	19,09%	80,91%
30	39,91%	60,09%	57,46%	42,54%	50,16%	49,84%

FONTE: o autor (2016).

QUADRO 41 – VALORES DAS CONTRIBUIÇÕES DAS CORRENTES HARMÔNICAS DO SUPRIDOR E CONSUMIDOR NA CORRENTE TOTAL NO PAC COM FONTE DE TENSÃO ISENTA DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Ordem h	I_{pac-h}					
	lan		lbn		lcn	
	Fonte	Carga	Fonte	Carga	Fonte	Carga
1	50,07%	49,93%	50,11%	49,89%	50,06%	49,94%
2	40,28%	59,72%	48,66%	51,34%	24,52%	75,48%
3	50,31%	49,69%	50,24%	49,76%	50,13%	49,87%
4	53,53%	46,47%	22,21%	77,79%	47,33%	52,67%
5	0,24%	99,76%	0,76%	99,24%	15,36%	84,64%
6	51,46%	48,54%	41,49%	58,51%	29,23%	70,77%
7	3,23%	96,77%	1,53%	98,47%	12,84%	87,16%
8	79,14%	20,86%	59,06%	40,94%	43,16%	56,84%
9	66,21%	33,79%	23,11%	76,89%	64,35%	35,65%
10	51,79%	48,21%	48,21%	51,79%	46,63%	53,37%
11	5,95%	94,05%	7,37%	92,63%	19,12%	80,88%
12	41,50%	58,50%	5,29%	94,71%	15,60%	84,40%
13	7,78%	92,22%	8,25%	91,75%	21,69%	78,31%
14	47,21%	52,79%	23,97%	76,03%	1,07%	98,93%
15	72,21%	27,79%	45,27%	54,73%	18,17%	81,83%
16	7,29%	92,71%	53,67%	46,33%	77,25%	22,75%
17	7,98%	92,02%	11,02%	88,98%	13,58%	86,42%
18	1,30%	98,70%	20,08%	79,92%	36,95%	63,05%
19	4,83%	95,17%	6,38%	93,62%	9,90%	90,10%
20	6,78%	93,22%	5,85%	94,15%	25,16%	74,84%
21	43,43%	56,57%	65,11%	34,89%	31,80%	68,20%
22	6,87%	93,13%	10,61%	89,39%	33,05%	66,95%
23	9,10%	90,90%	10,89%	89,11%	19,10%	80,90%
24	20,32%	79,68%	6,20%	93,80%	29,46%	70,54%
25	9,57%	90,43%	10,26%	89,74%	19,61%	80,39%
26	8,17%	91,83%	20,41%	79,59%	26,39%	73,61%
27	46,77%	53,23%	76,46%	23,54%	37,73%	62,27%
28	49,60%	50,40%	32,22%	67,78%	10,32%	89,68%
29	53,62%	46,38%	9,62%	90,38%	13,39%	86,61%
30	5,99%	94,01%	39,36%	60,64%	28,44%	71,56%

FONTE: o autor (2016).