

UMA PROPOSTA PARA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE SENSIBILIDADE ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Gustavo Gonçalves dos Santos, Raquel Cristina Filiagi Gregory, Andréia Crico dos Santos, José Carlos de Oliveira

Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

g.gustavo.santos@gmail.com, raquel.filiagi@gmail.com, andrea.crico@gmail.com, joliveira@ufu.br

Resumo - O avanço da tecnologia e os novos processos e equipamentos presentes nas instalações elétricas tem causado expressivos aumentos das distorções harmônicas. Estes produzem e injetam correntes harmônicas que podem interagir com a rede elétrica causando vários efeitos indesejáveis. Visando uma avaliação da situação prévia ou presente nas redes, estudos relacionados com a determinação das tensões e correntes se fazem necessários, os quais, normalmente, são realizados através de programas computacionais diversos. Não obstante tais recursos, as determinações formuladas pelos agentes reguladores exigem, muitas vezes, o conhecimento real do estado operacional das redes de transmissão e distribuição, fato este que orienta para a utilização de medidores de qualidade da energia. Neste cenário, surge a questão da busca de meios para otimizar os processos de monitoração, assunto este embrionariamente tratado neste trabalho, o qual encontra-se centrado no estabelecimento de meios para a identificação dos barramentos e linhas mais susceptíveis às distorções quando das injeções harmônicas pelos consumidores. Esta técnica se faz relevante para posteriores estudos de alocação de medidores e aplicação das metodologias para estimação de estado quanto aos níveis de distorção presentes na rede como um todo, em consonância com os termos e valores previstos no PRODIST.

Palavras-Chave - Áreas de sensibilidade, Fluxo Harmônicos, Injeção de harmônicos, PRODIST, Qualidade da Energia Elétrica.

A PROPOSAL FOR DEFINING SENSITIVITY AREAS TO HARMONIC DISTORTION

Abstract - The advances of the technology, new processes and equipment present in electrical installations have caused significant increases in harmonic distortion. These produce and inject harmonic currents that can interact with the power grid causing several undesirable effects. Seeking the evaluation of previous or present situation in networks, studies relating to the measurement

of voltages and currents are needed, which are usually carried out through various computer programs. Despite these resources, the decisions made by regulators often require the actual knowledge of the operating state of the transmission and distribution networks, a fact that guides the use of power quality meters. In this scenario, the question arises of finding ways to optimize the monitoring process, issue this embryonic treated in this work, which is focused on establishing means for the identification of buses and more susceptible lines to distortions when the harmonic injections by consumers. This technique is relevant for subsequent allocation of monitoring devices and application of techniques for the estimation of the voltage and current distortion levels in the network as a whole, in line with the terms and values set out in PRODIST.

Keywords - Harmonics flow, Injection of harmonics, PRODIST, Power Quality, Sensitive areas.

NOMENCLATURA

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DIT _h	Distorção Individual de Tensão
DTT	Distorção Total de Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência

I. INTRODUÇÃO

A atual e crescente preocupação dos consumidores, concessionárias e órgãos reguladores nos assuntos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), deve-se, dentre outros motivos, a elevação do número de dispositivos baseados em eletrônica de potência e ao aumento da importância de medidas voltadas à racionalização energética [1,2]. Esses equipamentos, e outros, geralmente se comportam como cargas não lineares e geram distorções nas formas de onda das tensões e correntes dos sistemas elétricos.

Nesse cenário, dentro do contexto da QEE, os fenômenos atrelados às distorções harmônicas têm sido focado com destaque nos últimos anos. Alguns dos principais efeitos da distorção da forma de onda da tensão e corrente são: aquecimento de equipamentos, diminuição da vida útil de componentes, sobretensões, diminuição da potência disponibilizada por equipamentos, mau funcionamento de dispositivos diversos, impactos sobre o fator de potência, interferências nas linhas de telecomunicações, etc. [3].



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Uma grande preocupação existente, atrelada como o tema ora posto, diz respeito à propagação de harmônicas no SEP. Em vista disso, programas computacionais se tornam cada vez mais utilizados para estudos diversos associados com a presença de cargas não lineares e a necessidade do atendimento aos padrões de fornecimento de energia elétrica aos consumidores [4]. Estes softwares, via de regra, permitem uma avaliação completa da rede elétrica e fornecem, computacionalmente, as mais diversas distorções de tensão e corrente, quer sejam os valores individuais ou totais. Não obstante tal reconhecimento, o fato é que, quando da análise das condições reais de operação, há, indiscutivelmente, a necessidade de medições diretas em campo e é dentro deste contexto que se insere a presente pesquisa.

Em se tratando da instalação de medidores de distorções harmônicas, vale ressaltar que, diante do grande número de barramentos e linhas que compõem um sistema elétrico, mensurar os impactos do conteúdo harmônico não é uma solução trivial, visto a necessidade de inúmeros instrumentos para o registro de tal grandeza [5]. De fato, tal ressalva se faz relevante diante dos custos dos medidores, canais de comunicação, etc., fato este que vem motivando o desenvolvimento de metodologias que visam, sobretudo, minimizar o custo total do monitoramento [6].

Nesse sentido, esse artigo encontra-se voltado para o estabelecimento de mecanismos destinados ao processo da identificação das distorções harmônicas presentes nos barramentos e linhas, através de medições diretas, empregando técnicas que conduzam a um menor número de medidores o possível. Para atingir tais metas as investigações são complexas e, num primeiro plano, passam pela detecção das áreas mais sensíveis de uma rede elétrica quanto aos impactos dos distintos pontos de geração de harmônicos, informação esta extremamente relevante para nortear os processos de otimização e alocação dos instrumentos minimamente necessários aos propósitos ora postos.

Somado aos fundamentos metodológicos voltados para a caracterização de um procedimento aplicável a uma prévia identificação das denominadas áreas sensíveis, são realizados estudos investigativos associados com um sistema elétrico padrão do IEEE – 14 barras, junto ao qual são injetadas correntes harmônicas em distintos barramentos de carga e, sequencialmente, determinados os pontos da rede que se mostram com maior sensibilidade às injeções harmônicas consideradas.

II. FUNDAMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O fluxo de potência ou fluxo de carga, consiste em uma análise algébrica das condições de operação do sistema de energia elétrica em regime permanente, cuja representação é feita por equações não lineares, as quais são resolvidas através de métodos computacionais desenvolvidos ao longo de muitos anos. Existem vários métodos para representar, numericamente, o comportamento de um sistema elétrico de potência. Dentre estes, o método de Newton-Raphson, e seus derivados, continua sendo amplamente utilizado pelos pesquisadores [7].

Nesta mesma linha, estudos de penetração harmônica em um sistema elétrico conduzem ao denominado fluxo

harmônico. Os resultados de tais estudos permitem quantificar o teor harmônico presente nos mais distintos pontos que formam uma instalação elétrica. Assim procedendo, torna-se factível avaliar se os níveis de distorção se apresentam compatíveis com os indicadores estabelecidos por normas nacionais e internacionais [8].

No que tange a metodologia utilizada, esta, normalmente, encontra-se fundamentada na determinação das tensões e correntes harmônicas nos sistemas elétricos através da clássica análise nodal. A formulação mais simples, conhecida como método da solução direta no domínio da frequência, utiliza apenas a sequência positiva e calcula a impedância da rede para as frequências de interesse [9]. Esta técnica, pelos seus princípios, não apresenta uma solução iterativa rede-carga, não inclui a modelagem explícita dos dispositivos geradores de harmônicos e realiza os cálculos para um equivalente monofásico, considerando os sistemas trifásicos e equilibrados. O algoritmo do cálculo consiste em identificar o conteúdo harmônico dos dados de corrente e, posteriormente, construir uma matriz de admitâncias para as frequências harmônicas presentes, considerando a dependência de seus elementos passivos. Por fim, cria-se o vetor de correntes para cada frequência e calcula-se as tensões por meio do teorema da superposição [8,9].

O princípio básico do método utilizado para calcular as tensões de cada ordem harmônica em determinada barra é apresentado na equação (1).

$$[\hat{V}_h] = [\hat{Z}_h][\hat{I}_h] \quad (1)$$

Onde:

$[\hat{V}_h]$ é o vetor das tensões harmônicas resultantes;

$[\hat{Z}_h]$ é a matriz das impedâncias harmônicas;

$[\hat{I}_h]$ é o vetor das correntes harmônicas injetadas no sistema.

Uma das maneiras de encontrar a matriz $[\hat{Z}_h]$ é obtendo o inverso da matriz de admitâncias do sistema para cada ordem harmônica. Vale ressaltar que as impedâncias variam de acordo com a frequência e, assim, há necessidade de efetuar as correções para cada ordem harmônica, resultando na matriz de admitâncias enunciada em (2).

$$[Y_h] = \begin{bmatrix} Y_{11h} & Y_{12h} & \cdots & Y_{1kh} & \cdots & Y_{1mh} \\ Y_{21h} & Y_{22h} & \cdots & Y_{2kh} & \cdots & Y_{2mh} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1h} & Y_{k2h} & \cdots & Y_{kkh} & \cdots & Y_{kmh} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1h} & Y_{m2h} & \cdots & Y_{mkh} & \cdots & Y_{mmh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

Y_{kkh} é a admitância própria da barra genérica k, na frequência correspondente a ordem harmônica h.

Y_{kmh} é a admitância mútua entre as barras genéricas k e m, na ordem harmônica h.

Uma vez que a matriz de impedância do sistema é a inversa da matriz admitância, a equação dada em (1) é resolvida, obtendo-se, assim, as mais distintas tensões para cada ordem harmônica. Uma vez determinados tais valores, estes podem

ser prontamente correlacionados com os limites estabelecidos pelas regulamentações vigentes.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece, no Módulo 8, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica Nacional (PRODIST), relativos à qualidade da energia elétrica.

No que se refere as distorções harmônicas, destacam-se duas variáveis fundamentais: a distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DIT_h) e a distorção harmônica total de tensão (DTT), conforme (3) e (4) [10].

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (4)$$

Onde,

V_h é a tensão harmônica de ordem h ;

V_1 é a tensão fundamental encontrada;

h é a ordem harmônica;

h_{max} é a ordem harmônica máxima.

De acordo com as equações supra referidas, são estabelecidos os valores de referências para as distorções harmônicas totais e individuais de tensão, em conformidade com as Tabelas I e II [11].

Tabela I – Valores e referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} \leq V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} \leq V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} \leq V_N \leq 230 \text{ kV}$	3

Tabela II – Níveis de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica (ímpar)	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$
3	6,5	5	4	2
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1,5
15	1	0,5	0,5	0,5
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
21	1	0,5	0,5	0,5

Muito embora o reconhecimento do processo de cálculo ora posto, o qual se encontra alicerçado em princípios tradicionais teóricos, o fato é que, para fins aplicativos, tem-se a necessidade de que as informações atreladas com as distorções presentes nas redes elétricas sejam ainda complementadas com trabalhos de medição em campo.

Isto posto, fica reconhecida a necessidade da busca de mecanismos voltado para a instalação de um número mínimo de medidores de qualidade de energia, como já dito, fato este que apontou para os estudos contemplados na sequência.

Para o atendimento a tais metas, reconhece-se que o processo de otimização de alocação dos instrumentos passa, necessariamente, pelas seguintes etapas:

- Definição das áreas de sensibilidade às distorções harmônicas;
- Através de métodos de otimização, identificar os pontos onde deverão ser instalados os medidores;
- Utilizando de técnicas para estimação de estado, estabelecer meios para, a partir das informações coletadas, determinar os níveis de distorções na rede como um todo;
- Por fim, analisar a eficácia do processo estabelecido através de estudos computacionais e medições em campo.

Neste contexto, vale ressaltar que o presente trabalho encontra-se imbuído do propósito de atender a primeira das etapas supra postas, qual seja, o conhecimento do que se denomina por “áreas sensíveis às distorções harmônicas”.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme o fluxograma ilustrado na Figura 1, a metodologia para os estudos das áreas de maior sensibilidade às distorções harmônicas baseia-se na inserção de um conteúdo harmônico de corrente em uma barra do sistema sob estudo e, como consequência, procede-se a determinação das distorções de tensão e corrente nas demais barras e linhas que compõem o complexo elétrico sob análise. Muito embora o reconhecimento das demais possibilidades, vale destacar que no presente trabalho serão calculadas apenas as tensões harmônicas.

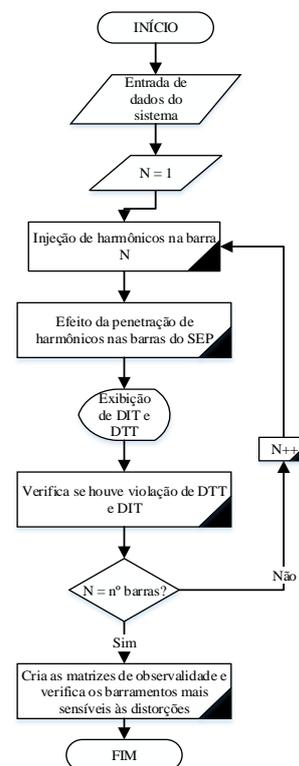


Fig. 1 - Fluxograma do método proposto

O processo é repetido através da mudança do local da injeção das correntes harmônicas, barra por barra, de forma individual. Para cada iteração, são avaliados, para os demais barramentos constituintes do arranjo, se há violação da DIT_h pré-estabelecida pelo usuário. Para fins do presente estudo,

tais valores correspondem, para cada ordem harmônica, a 50% dos limites estabelecidos no PRODIST. Esta medida se apresenta como conservadora em relação aos próprios valores de referência da norma.

Ao final do processo iterativo, é possível construir matrizes de observabilidade, as quais se apresentam na forma binária, criadas para cada ordem harmônica sob estudo. São avaliadas as distorções individuais e as totais, como será posteriormente apresentado em tabelas de sensibilidade. Nestas utiliza-se de dois valores para a grandeza de observabilidade. O número 1 indica que a tensão harmônica em questão foi violada em relação ao padrão estabelecido e o número 0 implica num valor inferior a este.

IV. ESTUDO DE CASO

A fim de verificar a eficiência da metodologia proposta, uma vez definida a topologia e parametrização do complexo sob análise, para o caso, o sistema IEEE 14 barras o qual é ilustrado na Figura 2, procede-se ao estudo de penetração harmônica nos termos aqui propostos. Para tanto, os trabalhos foram conduzidos com base no programa computacional em linguagem MATLAB (arquivos.m) para o estudo de penetração harmônica, desenvolvido em [8].

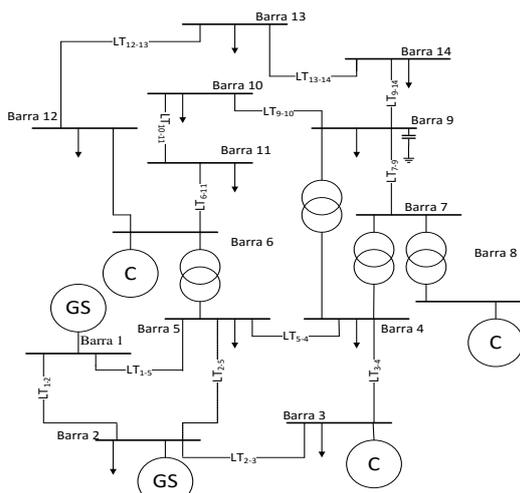


Fig. 2 – Sistema IEEE 14 barras

Os dados do sistema IEEE 14 barras são exibidos nas Tabelas III a VI [11,12].

Tabela III – Dados das barras na base de 100 MVA

Barra	Tensão		Carga		Geração		Shunt (pu)
	Módulo (pu)	Ângulo (graus)	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1,060	0,000	-	-	232,4	-16,9	-
2	1,045	-4,983	21,7	12,7	40	42,4	-
3	1,010	-12,725	94,2	19,0	-	23,4	-
4	1,018	-10,313	47,8	-3,9	-	-	-
5	1,020	-8,774	7,6	1,6	-	-	-
6	1,070	-14,221	11,2	7,5	-	12,2	-
7	1,062	-13,360	-	-	-	-	-
8	1,090	-13,360	-	-	-	17,4	-
9	1,056	-14,939	29,5	16,6	-	-	0,19
10	1,051	-15,097	9,0	5,8	-	-	-
11	1,057	-14,791	3,5	1,8	-	-	-
12	1,055	-15,076	6,1	1,6	-	-	-
13	1,050	-15,156	13,5	5,8	-	-	-
14	1,036	-16,034	14,9	5,0	-	-	-

Tabela IV – Dados das máquinas síncronas

Nº da barra da máquina síncrona	S (MVA)	ra (pu)	xd (pu)	x'd(pu)	x''d(pu)
1	615	0,00	0,8979	0,2995	0,23
2	60	0,0031	1,05	0,1850	0,13
3	60	0,0031	1,05	0,1850	0,13
6	25	0,0014	1,25	0,232	0,12
8	25	0,0041	1,25	0,232	0,12

Tabela V – Tensão de referência nas barras

Barra(s)	Tensão Base (kV)
1, 2, 3, 4 e 5	69
8	18
6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14	13,8

Tabela VI – Dados dos ramos na base de 100 MVA

Ramo	De	Para	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	2	0,01938	0,05917	0,0528
2	1	5	0,05403	0,22304	0,0492
3	2	3	0,04699	0,19797	0,0438
4	2	4	0,05811	0,17632	0,0340
5	2	5	0,05695	0,17388	0,0346
6	3	4	0,06701	0,17103	-
7	4	5	0,01335	0,04211	-
8	4	7	-	0,20912	-
9	4	9	-	0,55618	-
10	5	6	-	0,25202	-
11	6	11	0,09498	0,19890	-
12	6	12	0,12291	0,25581	-
13	6	13	0,06615	0,13027	-
14	7	8	-	0,17615	-
15	7	9	-	0,11001	-
16	9	10	0,03181	0,08450	-
17	9	14	0,12711	0,27038	-
18	10	11	0,08205	0,19207	-
19	12	13	0,22092	0,19988	-
20	13	14	0,17093	0,34802	-

Como já mencionado, para o presente estudo, optou-se pela inserção de uma fonte de corrente harmônica em cada barra, vez a vez, considerando 10% de 3º harmônico, 15% de 5º harmônico e 10% de 7º harmônico. Os valores percentuais são referidos à corrente fundamental dos respectivos barramentos de carga empregados para os estudos.

Ressalta-se que, para todas as barras onde se fazem presentes os consumos na forma P+jQ, foram injetadas correntes harmônicas nos moldes ora postos. Apenas os barramentos que contêm tão exclusivamente unidades de geração foram desconsiderados para este fim.

O emprego de injeções harmônicas individualmente produzidas pelos barramentos, e não de forma concomitante entre os pontos de consumo, está fundamentado na busca da interdependência entre causas e efeitos, motivo pelo qual estas injeções foram tratadas na forma individualizada aqui considerada. Por tal motivo, não houve motivação para alterações dos ângulos de fase de uma mesma componente harmônica.

Os resultados para as distorções individuais atreladas com as injeções harmônicas, em termos da proposta binária anteriormente explicada, encontram-se indicados nas Tabelas VII (3º harmônico), VIII (5º harmônico) e IX (7º harmônico). Os resultados evidenciam, na coluna identificada pelo somatório, a quantidade de barramentos que sofreram os impactos oriundos das distintas injeções de corrente feitas. Desta forma observa-se, por exemplo, que uma injeção de

corrente harmônica de ordem 7 na barra 6 foi capaz de afetar 5 barramentos concomitantemente.

Considerando os resultados apresentados nas tabelas supramencionadas, constata-se que, para a injeção de correntes de 3º harmônico, há uma menor sensibilidade das barras quando comparadas com a injeção de correntes de 5º e 7º harmônico, evidenciando, assim, uma maior sensibilidade do complexo elétrico para estas duas últimas frequências.

Tabela VII – Resultados para a injeção de correntes harmônicas de 3ª ordem – DIT₃

		Barra Sensibilizada														Σ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Barra de injeção de corrente de 3º harmônico	1																
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	4
	7																
	8																
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3
	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	4
	13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
	Σ	0	0	1	0	0	4	0	0	0	0	3	4	4	2		

Tabela VIII – Resultados para a injeção de correntes harmônicas de 5ª ordem - DIT₅

		Barra Sensibilizada														Σ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Barra de injeção de corrente de 5º harmônico	1																
	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	7																
	8																
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	5
	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
	Σ	0	1	1	2	2	5	0	0	0	2	5	5	5	4		

Tabela IX – Resultados para a injeção de correntes harmônicas de 7ª ordem – DIT₇

		Barra Sensibilizada														Σ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Barra de injeção de corrente de 7º harmônico	1																
	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	7																
	8																
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	5
	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
	Σ	0	1	1	1	1	5	0	0	0	2	5	5	5	4		

Como pode ser observado, as barras 6, 11, 12, 13 e 14 se mostraram as mais sensíveis aos fenômenos ora tratados. Por outro lado, pode-se ainda observar que tais barras se apresentaram como aquelas de onde foram originadas os maiores índices de distorção.

Tais conclusões podem ser prontamente verificadas na Tabela X, que exhibe os pontos de violação das DTT, para a injeção das correntes de 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica.

Tabela X – Resultados para as injeções de correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem - DTT

		Barra Sensibilizada														Σ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Barra de injeção de corrente de 3º, 5º e 7º harmônico	1																
	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	7																
	8																
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	5
	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5
	14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	4
	Σ	0	1	1	2	2	5	0	0	0	2	5	5	5	4		

Diante do desempenho obtido, é válido afirmar que a região formada pelas barras 6, 11, 12, 13 e 14 compreende maior sensibilidade às distorções harmônicas. Portanto, estes se apresentam, à princípio, como os barramentos para os quais não se poderiam dispensar a instalação de medidores de qualidade da energia elétrica.

O gráfico da Figura 3 exibe os resultados de DTT em porcentagem para cada barra, em função da injeção de correntes harmônicas, vez a vez, nas barras correspondentes a região de sensibilidade harmônica, em conformidade com os percentuais referidos anteriormente. Conforme esperado, a barra cuja fonte harmônica foi inserida, apresentou a maior DTT. A Figura 3 evidencia os barramentos mais afetados.

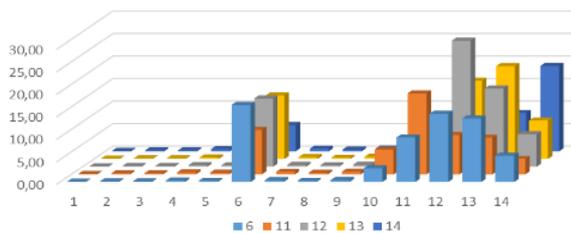


Fig. 3 – Percentual da DTT para os barramentos do sistema elétrico analisado

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposição de estratégia para o estudo e avaliação das regiões de maiores sensibilidades às distorções harmônicas presentes nos sistemas elétricos. A metodologia baseou-se na injeção de correntes harmônicas nas barras do sistema, ambicionando observar o comportamento individual de cada barra frente as distorções geradas pelas demais.

Para a implementação da estratégia, foi realizado o cálculo do fluxo harmônico utilizando o método da solução direta no domínio da frequência, o qual consiste em calcular o vetor de tensão por meio das matrizes de impedâncias e correntes harmônicas de uma dada ordem h .

Em vista disso, e baseando-se nas etapas previamente estabelecidas, foi implementado no software MATLAB o algoritmo responsável pela detecção das regiões de sensibilidades às distorções harmônicas frente as regulamentações vigentes.

No que tange ao estudo de caso, observou-se a existência de regiões de elevada sensibilidade harmônica e, conseqüentemente, maior susceptibilidade à violação dos níveis de referência estabelecidos a partir das regulamentações. Adicionalmente, os resultados apontaram que muitas das barras consideradas sensíveis são também as grandes causadoras de distorções no complexo elétrico utilizado para os estudos.

Diante dessa conjuntura, espera-se que este trabalho, ainda embrionário, possa contribuir para o desenvolvimento de estratégias voltadas para a minimização do número de medidores de qualidade da energia a serem instalados numa rede elétrica de transmissão ou distribuição.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York, NY, USA: The McGraw-Hill Companies, 1996.
- [2] OLIVEIRA, L. C.; MELO, G. A.; SOUZA, J. B.; CANESIN, C. A.; BONATTO, B. D.; BELCHIOR, F. N.; MERTENS, E. Harmonic propagation analysis in electric energy distribution systems. *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*. Lisbon, 2011.
- [3] GHORBANI, M. J.; MOKHTARI, H. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 5, No. 1, February 2015, pp. 166-174.
- [4] SILVA, M; GONZALEZ, M; NOHME, E; SILVA S. Programas computacionais para estudos de harmônicos em sistemas elétricos. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – IV SBSE*. Goiânia, 2012.
- [5] ARRUDA, E; KAGAN, N. Estimación de estados usando estratégias evolutivas. *Sba Controle & Automação*, vol. 20, Natal, 2006
- [6] SOARES, Débora. *Um Algoritmo Branch and Bound para o Problema de Alocação Ótima de Medidores de Qualidade de Energia Elétrica em Rede de Transmissão*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2007.
- [7] CANOSSA, Jâine. *Um Programa Interativo pra Estudos de Fluxo de Potência*. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2007.
- [8] CRICO, Andréia; TAVARES, Carlos Eduardo. Desenvolvimento de um aplicativo computacional para cálculo de penetração harmônica em sistemas elétricos e projeto de filtros passivos sintonizados. *Revista Horizonte Científico*, v. 8, n° 1, Uberlândia, julho de 2014.
- [9] SILVA, Marcio. *Estudo de Propagação Harmônica em redes de distribuição considerando a característica estocástica das cargas*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
- [10] Agência Nacional de Engenharia Elétrica - ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, 01 de janeiro de 2016.
- [11] MORAES, Rui, *Sincrofasores em sistemas de potência: aplicações na estimação de estado*. Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2009.
- [12] KODSI, Sameh; CAÑIZRES, Claudio. *Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with facts controllers*. Acedido em 04 de julho, em: <https://ece.uwaterloo.ca/~ccanizar/papers/IEEEBenchmarkrkTFreport.pdf>.