ANÁLISE DA AÇÃO CONJUNTA DE CARGAS HARMÔNICAS EM UMA SMART GRID

ANALYSIS OF JOINT ACTION OF HARMONIC LOADS IN A SMART GRID

REGINA MARIA DE **LIMA NETA**[1*], ALEXSANDRO ALEIXO PEREIRA DA **SILVA**[2], JOSÉ MORAES **GURGEL NETO**[3], JOBSON DE ARAÚJO **NASCIMENTO**[4], ADI NEVES **ROCHA**[5]

1. Docente do curso de graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário Cesmac; **2.** Doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Pernambuco; **3.** Docente do curso de graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário Cesmac; **4.** Docente do curso de graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário Cesmac; **5.** Docente do curso de graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário Cesmac.

* Rua Cônego Machado, s/n - Farol, Maceió, Alagoas, Brasil. CEP: 57.020-200. regina.mlneta@gmail.com

Recebido em 11/05/2017. **Aceito** para publicação em 05/06/2017

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar a ação conjunta das cargas harmônicas no desequilíbrio de tensão em uma smart grid, o que provoca o aparecimento de harmônicos de terceira ordem no lado Δ dos transformadores de distribuição, os tais podem causar danos nos equipamentos elétricos. Além disso, foi analisado o efeito de desequilíbrios e afundamentos de tensão admitidos pela legislação e que foram amplificados pela forte presença de harmônicos. Um alimentador típico de 13,8 kV foi estudado e considerou-se a contribuição harmônica de consumidores residenciais e comerciais, veículos elétricos e geração distribuída através de sua modelagem no software ATPDraw.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos, qualidade de energia, geração distribuída, Smart Grid, harmônicos.

ABSTRACT

This work has the objective of analyzing the joint action of the harmonic loads in the voltage unbalance in a smart grid, which causes the appearance of third order harmonics on the Δ side of the distribution transformers, which can cause damage to the electrical equipment. In addition, we analyzed the effect of imbalances and voltage sags admitted by the legislation and amplified by the strong presence of harmonics. A typical 13.8 kV feeder was studied and considered the harmonic contribution of residential and commercial consumers, electric vehicles and distributed generation through its modeling in ATPDraw software.

KEYWORDS: Electrical vehicles, power quality, distributed generation, Smart Grids, harmonics.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda mundial de energia elétrica, crise no setor elétrico e aumento dos preços na produção tradicional de energia, se tornou frequente no planejamento do setor elétrico a busca por novas fontes de energia renovável. Atualmente, a geração distribuída (GD) passa a ser, nesse cenário, uma opção para participar da sua reestruturação, contribuindo para o aumento da confiabilidade e qualidade do fornecimento, suprimento à demanda do sistema elétrico, além de atender os consumidores localizados em áreas remotas com baixa densidade de carga[1,2].

O conceito de redes elétricas inteligentes tem sido utilizado, em escala piloto, por distribuidoras de energia de todas as regiões do país, principalmente em regiões metropolitanas. Nesse contexto, a GD surgiu como uma forma de aliviar a sobrecarga no sistema de geração hidrelétrico e termelétrico.

O impacto que a GD irá causar no sistema ao qual foi inserida depende de uma série de fatores, dentre os quais podem ser ressaltados: o ponto de conexão com a rede, o nível de penetração da geração, as características de carregamento e configuração do próprio sistema de distribuição[1,3].

Além disso, o desenvolvimento de veículos elétricos (VEs) atingiu nos últimos anos, um grau jamais imaginado de importância técnica e estratégica, principalmente, devido às fortes pressões da sociedade atual para a redução da poluição ambiental advinda do uso de combustível fóssil. Uma das desvantagens é o aumento dos harmônicos nas redes elétricas devido à eletrônica de potência dos carregadores[4].

A inserção dos VEs e das GDs em conjunto com as cargas eletrônicas dos consumidores pode representar um novo desafio para o sistema de energia elétrica, especialmente para a rede de distribuição, onde ambos estarão diretamente conectados. A questão chave é descobrir como o sistema elétrico verá o acréscimo em suas cargas totais.

É comprovadamente aceito no meio científico, que uma das justificativas para a utilização dos transformadores de distribuição com ligação Δ-Y seria eliminar os

harmônicos múltiplos do terceiro no lado Δ. No entanto, essa afirmação só é válida quando as tensões trifásicas encontram-se perfeitamente equilibradas.

Tendo em vista que por mais que as distribuidoras de energia elétrica tentem repartir as cargas monofásicas de maneira uniforme nas três fases dos transformadores, quase nunca isso ocorre na prática. Daí o desequilíbrio de tensão no final do alimentador pode não estar dentro do limite estipulado pela ANEEL para o barramento de média tensão.

Portanto, é importante avaliar os impactos da possível presença de correntes harmônicas monofásicas na rede elétrica, produzidas pelos circuitos eletrônicos e que podem causar efeitos indesejáveis na rede de distribuição.

O objetivo dos estudos harmônicos é quantificar a distorção na forma de onda da tensão e da corrente em vários pontos da rede de distribuição, para garantir o seu correto funcionamento.

De forma similar a outros estudos do sistema elétrico, a análise harmônica consiste dos seguintes passos[5]:

- Definição dos equipamentos geradores de harmônicos e determinação dos modelos para suas representações;
- Determinação dos modelos para representar os outros componentes do sistema incluindo redes externas;
- Simulação do sistema em várias situações.

Como estudo de caso, avaliou-se um alimentador de 13,8 kV com a ferramenta computacional *ATPDraw*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise proposta, utilizou-se um alimentador típico que possui extensão de 4,95 km, com topologia radial, 13 barras na média tensão, 13 transformadores abaixadores 13,8/0,38 kV Δ-Y aterrado, totalizando 113 consumidores entre residenciais, comerciais, rurais e prédios públicos[6].

A rede de distribuição desse estudo não dispõe de regulador de tensão, considerando-se seu comprimento. Todos os elementos que injetam correntes harmônicas foram conectados nos secundários dos transformadores. A topologia do alimentador pode ser vista na Figura 1.

Linhas de Distribuição

Sendo o principal meio utilizado para a interconexão dos dispositivos que compõem um sistema elétrico, as linhas de distribuição são caminhos naturais para a propagação de distorções harmônicas pela rede. Portanto, devem ser adequadamente representadas a fim de obter com precisão os fluxos de harmônicos.

A análise do comportamento das linhas de distribuição, seja em regime permanente ou transitório, depende da utilização de um modelo apropriado.

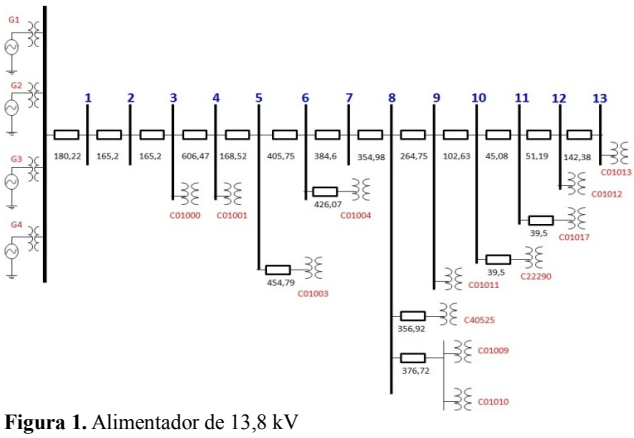

Figura 1. Alimentador de 13,8 kV

O efeito do solo deve ser considerado no cálculo dos parâmetros, pois, sua presença altera as distribuições dos campos eletromagnéticos gerados pelas correntes nos condutores. Assim, pressupõe-se que na ocorrência de componentes harmônicas existirão correntes de condução pelo solo.

Considerando que o sistema a ser modelado possui um grande número de vãos com comprimentos pequenos, a simulação utilizando tanto o modelo de J. Marti quanto Bergeron (modelos cujos parâmetros de linha variam com a frequência) seria impraticável, devido ao elevado esforço computacional.

Por intermédio de uma análise da resposta em frequência de uma linha de 1 km com o modelo mais completo (J. Marti) e o mais simples (PI equivalente distribuído), verificou-se uma diferença significativa de 16% em 6,4 kHz, vide Figura 2.

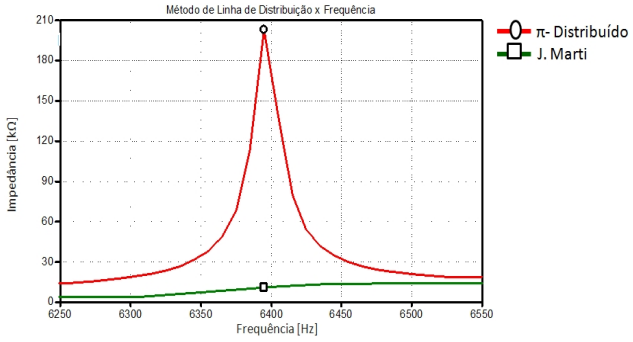

Figura 2. Resposta em frequência de uma linha nos modelos PI distribuído e J Marti

Como o maior comprimento de linha no alimentador estudado foi de 0,85 km, considerou-se uma boa aproximação utilizar o modelo distribuído, esse que considera a resistência, a reatância série e a capacitância shunt por unidade de comprimento.

Para análise em frequência, a condutância transversal da linha não pode ser ignorada, devido à influência na impedância harmônica equivalente[7]. Nos modelos de

linhas disponíveis no *ATPDraw*, a condutância é definida por um número padrão. Desta forma, empregou-se a condutância calculada em shunt com o modelo a parâmetros distribuídos.

A modelagem completa da linha para simulação está apresentada na Figura 3.

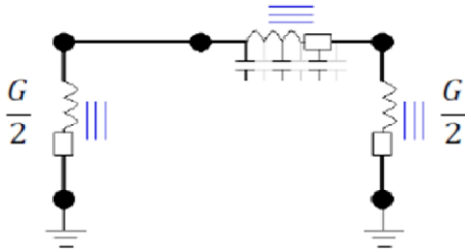

Figura 3. Modelo da linha de distribuição para estudo harmônico

Os dados das linhas de distribuição, simuladas a parâmetros distribuídos com modelo PI. Os parâmetros dos condutores do alimentador podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das Linhas de Distribuição

Tipo de Cabo	Sequencia	R (Ω/km)	X_L (Ω/km)	S (µmho/km)	G (nS/km)
C - 16	Zero	1,46	2,23	1,58	0,456
	Positiva	1,28	0,46	3,51	
C - 25	Zero	1,01	2,19	1,60	0,449
	Positiva	0,83	0,43	3,63	

Cargas Harmônicas

A modelagem de cargas harmônicas é tema recorrente em diversos estudos da literatura. Para análises de harmônicos, é suficiente modelar tais cargas por fontes de corrente desde que os níveis de distorção de tensão simulados sejam inferiores a 10%[8].

A modelagem é feita de tal forma que parte fundamental e parte harmônica estejam separadas. Enquanto a parcela a 60 Hz é representada por meio de uma associação de uma resistência e uma indutância ou capacitância, as componentes harmônicas são representadas por *N* fontes de corrente; sendo *N* o número de harmônicos produzidos pela carga, onde cada fonte injeta um harmônico de uma determinada ordem[9].

Neste trabalho, optou-se pela modelagem da carga fundamental em circuito paralelo que a depender do fator de potência pode ser indutivo ou capacitivo, como mostrado na Figura 4.

Em que, h_N representa a fonte de corrente do harmônico *N*, e o ramo paralelo *R* e *X* representa a componente fundamental da carga. A corrente eficaz solicitada pela carga constitui-se da soma da corrente a 60 Hz com as correntes harmônicas.

Para caracterizar o comportamento harmônico das cargas próprias do alimentador analisado, foram utilizados dados de medição do perfil harmônico (com módulo e ângulo) de consumidores típicos residenciais, comerciais e iluminação pública[7].

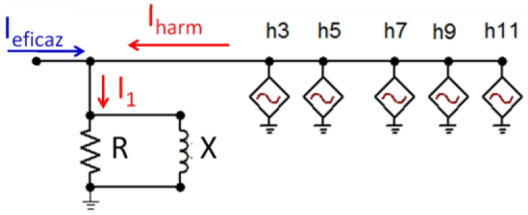

Figura 4. Modelo da carga harmônica

Para caracterizar o comportamento harmônico das cargas próprias do alimentador analisado, foram utilizados dados de medição do perfil harmônico (com módulo e ângulo) de consumidores típicos residenciais, comerciais e iluminação pública[6].

Veículo Elétrico

Para representar a injeção harmônica na rede elétrica através de veículos elétricos, utilizou-se a modelagem feita por[6].

O perfil harmônico do carregador de veículo elétrico modelado, com potência de 3,7 kW e corrente de carga de 16 A, é apresentado na Tabela 1III.

A Tabela 2 descreve as características elétricas do carregador utilizado, com potência de 3,7 kW.

Tabela 2. Especificações do Carregador de Veículo Elétrico

Grandeza	Valor
Tensão de Entrada	310 V_{pico}
Frequência da Rede	60 Hz
Potência de Saída	3,7 kW
Corrente de Carga	16 A_{rms}
Ripple de Tensão	3%
Ripple de Corrente	20%
Tensão da Bateria	278 V

A **Figura 5** mostra a forma de onda da tensão na saída do carregador, onde se verifica que a tensão média de carregamento da bateria tem o valor de 278 V, conforme especificação do modelo do carregador utilizado neste trabalho.

O perfil harmônico do carregador de veículo elétrico modelado é apresentado na

Tabela 3.

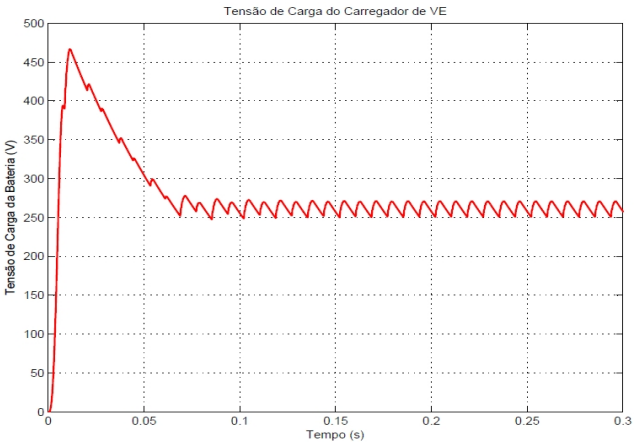

Figura 5. Tensão de saída do Carregador

Tabela 3. Perfil Harmônico do Veículo Elétrico

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (º)
1	100	5,0
3	21,52	209,1
5	4,09	155,0
69	1,17	209,6
71	2,17	203,4
THDi = 22,3% | I_{rms} = 16 A		

Geração Distribuída

Como fonte de geração distribuída utilizou-se uma central solar com capacidade 400 kWpico e conectada à rede de distribuição. O diagrama unifilar da usina no ponto de conexão é ilustrado na Figura 6.

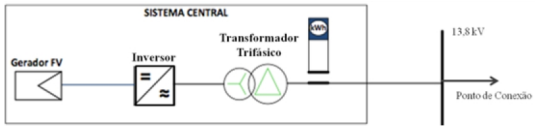

Figura 6. Esquema Básico da Central Solar

Para a modelagem desta geração distribuída, efetuou-se a injeção de corrente harmônica no local de instalação, sabendo que os valores característicos de harmônicos predominantes ocorrem em altas frequências devido ao chaveamento *pwm*.

Considerando-se um inversor trifásico com chaveamento *pwm* e frequência de comutação de 2,7 kHz, valor típico para esse tipo de conversor. Analisou-se apenas o impacto dos harmônicos cujas amplitudes eram maiores que 1% da fundamental.

Segundo dados fornecidos pela literatura, os valores típicos de potência de central solar de 400 kWpico no horário de 12 h (horário de maior incidência solar durante o dia) constitui-se de 420,6 kVA, com tensão de 13,8 kV e corrente eficaz de 17,6 A[10].

Sendo assim, o espectro harmônico do conversor solar obtido para esta condição é apresentado na **Tabela** 4.

Tabela 4. Perfil Harmônico da Usina Fotovoltaica

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (º)
1	100	161,9
43	8,10	92,8
47	7,40	92,2
89	5,60	89,3
91	5,49	269,1
THDi = 14,1% | I_{rms} = 17,6 A		

3. RESULTADOS

A partir das modelagens dos componentes da rede de distribuição foram monitorados os harmônicos no lado de 13,8 kV (distribuição) ao longo do alimentador em função do desequilíbrio de tensão quando ocorre a inserção das cargas harmônicas nos secundários dos transformadores de distribuição, conforme **Figura 7**.

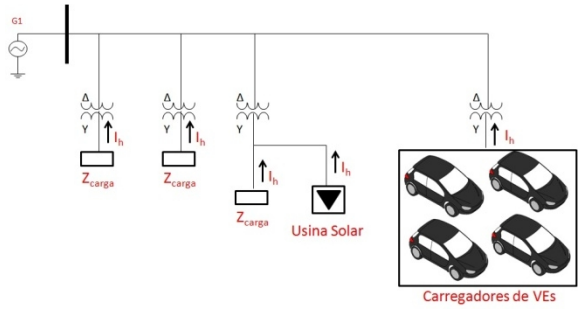

Figura 7. Diagrama Unifilar do sistema analisado

Foi considerado um quantitativo de 100 VEs inseridos ao longo do alimentador.

O desequilíbrio de tensão foi inserindo através da modificação na tensão da barra infinita no início do alimentador, considerando-se que o fator de desequilíbrio exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão expressa em termos percentuais da componente de sequência positiva, vide equação (1).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100\% \quad (1)$$

A fim de analisar a influência das correntes harmônicas injetadas na rede elétrica através dos secundários dos transformadores de distribuição, sob condições de desequilíbrio de tensão e de afundamento de tensão, foram simulados os seguintes cenários:

- Cenário 1: Tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2% e sem afundamento de tensão na rede elétrica.
- Cenário 2: Tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2% e com afundamento de tensão na rede elétrica de 5%.

Considerando o que preconiza o PRODIST, o desequilíbrio máximo permitido para redes de distribuição é de 2%[11]. O desequilíbrio de tensão foi inserido através da modificação na tensão da barra infinita no início do alimentador.

O afundamento de tensão foi implementado através da modificação na tensão da barra infinita no início do alimentador, considerando-se o limite estipulado pela ANEEL para sistemas de distribuição de 0,95 pu[11].

Análise Harmônica da Tensão

O comportamento do terceiro harmônico na forma de onda da tensão no lado de 13,8 kV, ligação em Δ, é apresentado na Figura 8.

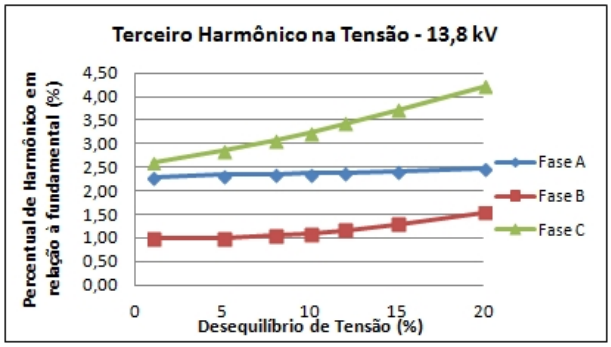

Figura 8. Terceiro harmônico na tensão no lado Δ

Verifica-se um crescimento do terceiro harmônico com o aumento do desequilíbrio, onde a fase C atingiu o patamar de 4,2% com um desequilíbrio de 20%.

Fica comprovado, assim, que apesar da ligação Δ-Y dos transformadores, harmônicos múltiplos do terceiro são injetados na média tensão em condições de desequilíbrio, de forma crescente conforme crescimento da assimetria entre as fases.

O gráfico das tensões nas fases A, B e C no final do alimentador devido somente a frequência fundamental de 60 Hz, em função do desequilíbrio de tensão pode ser observado na Figura 9.

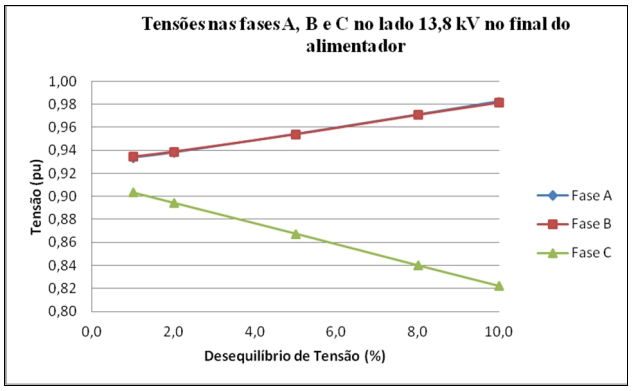

Figura 9. Tensão nas fases A, B e C em 60 Hz no lado 13,8 kV no final do alimentador em função do Desequilíbrio de Tensão na rede elétrica

Nota-se que a tensão na fase C decresceu consideravelmente, atingindo o valor de 0,82 pu, muito abaixo do permitido pela legislação vigente de 0,95 pu, enquanto tanto na fase A quanto na fase B a tensão cresceu para 0,98 pu com desequilíbrio de tensão de 10%.

Análise Harmônica da Corrente

O comportamento do terceiro harmônico na forma de onda da corrente no lado de 13,8 kV, ligação em Δ, é apresentado na Figura 10.

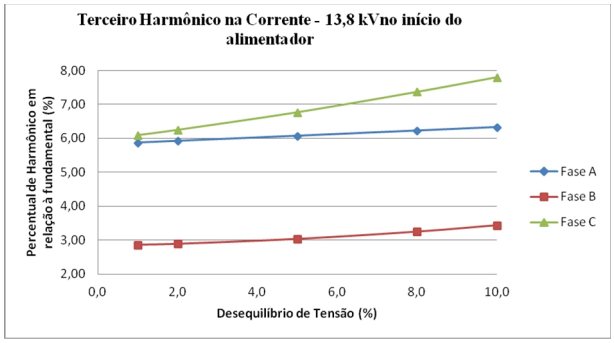

Figura 10. Terceiro harmônico na corrente no lado Δ

Em relação ao observado com a forma de onda da tensão, verifica-se que com a corrente, as distorções harmônicas têm maiores proporções, onde a fase C atingiu o patamar de 8,0 % com um desequilíbrio de 10%, a fase A, 6,33% e a fase B, 3,43%.

Análise com Distúrbios na Tensão

- **Cenário 1**

A análise do sistema com tensão de alimentação com

desequilíbrio de tensão de 2% e sem afundamento de tensão na rede elétrica, resultou no perfil de tensão mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Tensões nas barras do alimentador – Cenário 1

Tensão ao longo do Alimentador - Cenário 3						
Barra	**Fase A**		**Fase B**		**Fase C**	
	V_{pico} (V)	**V_{pu}**	**V_{pico} (V)**	**V_{pu}**	**V_{pico} (V)**	**V_{pu}**
1	10370	0,92	10430	0,93	9562	0,88
2	10360	0,92	10430	0,93	9554	0,88
3	10350	0,92	10420	0,92	9547	0,88
4	10320	0,92	10390	0,92	9513	0,87
5	10310	0,92	10380	0,92	9506	0,87
6	10300	0,91	10360	0,92	9488	0,87
7	10280	0,91	10350	0,92	9473	0,87
8	10270	0,91	10330	0,92	9460	0,87
9	10260	0,91	10330	0,92	9453	0,87
10	10260	0,91	10320	0,92	9451	0,87
11	10260	0,91	10320	0,92	9450	0,87
12	10260	0,91	10320	0,92	9449	0,87
13	10260	0,91	10320	0,92	9449	0,87

O gráfico das tensões nas fases A, B e C ao longo do alimentador pode ser observado na Figura 11.

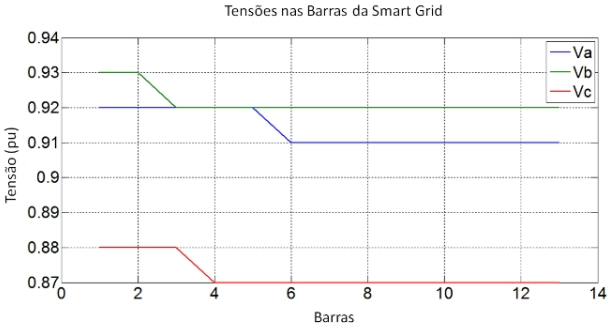

Figura 11. Tensões nas Barras para o Cenário 1

Observa-se que, com o desequilíbrio de tensão de 2%, as tensões nas barras infligem o limite estipulado pela ANEEL. Verifica-se que a ação conjunta das correntes harmônicas resultam no afundamento de tensão no lado de média tensão do alimentador, a fase C foi a mais afetada com um afundamento de 13%, o que resulta em tensão precária nesse barramento. As fases B e C apresentaram decréscimo de 9% e 8%, respectivamente.

- **Cenário 2**

A análise do sistema com tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2% e com afundamento de tensão na rede elétrica de 5%, resultou no perfil de tensão mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Tensões nas barras do alimentador – Cenário 2

Tensão ao longo do Alimentador - Cenário 3						
Barra	**Fase A**		**Fase B**		**Fase C**	
	V_{pico} (V)	**V_{pu}**	**V_{pico} (V)**	**V_{pu}**	**V_{pico} (V)**	**V_{pu}**
1	10200	0,91	10270	0,91	9853	0,87
2	10190	0,90	10260	0,91	9845	0,87
3	10180	0,90	10260	0,91	9838	0,87
4	10150	0,90	10220	0,91	9802	0,87
5	10140	0,90	10220	0,91	9795	0,87
6	10130	0,90	10200	0,91	9776	0,87
7	10110	0,90	10180	0,90	9761	0,87
8	10100	0,90	10170	0,90	9747	0,87
9	10090	0,90	10160	0,90	9740	0,86
10	10090	0,90	10160	0,90	9738	0,86
11	10090	0,90	10160	0,90	9737	0,86
12	10090	0,90	10160	0,90	9737	0,86
13	10090	0,90	10160	0,90	9737	0,86

O gráfico das tensões nas fases A, B e C ao longo do alimentador pode ser observado na Figura 11.

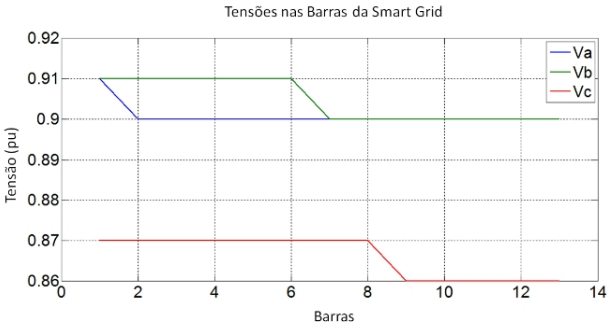

Figura 11. Tensões nas Barras para o Cenário 2

Foi observado que, com o desequilíbrio de tensão de 2% e com o afundamento de 5%, as tensões nas barras excedem o limite estipulado pela ANEEL. Verificou-se que a ação conjunta de correntes harmônicas amplificam o afundamento de tensão no lado de média tensão, resultando em diminuição entre 9% e 14% nas três fases. Novamente, a fase C apresentou o menor módulo de tensão.

5. CONCLUSÃO

Apenas o tipo comum de ligação Δ-Y dos transformadores de distribuição não é suficiente para deter a

circulação das correntes harmônicas de ordem três em sistemas elétricos desequilibrados.

Pode-se afirmar que as componentes harmônicas, mesmo que de ordem elevada, como no caso do inversor na geração fotovoltaica, e nos carregadores dos veículos elétricos, contribuem para que a distúrbios que ocorrem do sistema elétrico sejam amplificados.

Conclui-se que é necessário um monitoramento eficaz dos harmônicos nas redes de distribuição para que graves problemas do setor elétrico sejam evitados no futur.

REFERÊNCIAS

[01] Braun-Grabolle P. *A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistema Elétrico de Distribuição Urbana*. 2010. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Santa Catarina.

[02] Reis LB dos. *Geração de Energia Elétrica*. 2.ed. Barueri/ SP: Manole, 2011.

[03] Gomes JPR, Boaventura WC, Silva SR, Cardoso EN, Lopes, B. M. *Impact of integrating a solar power plant in a distribution feeder considering short circuit events*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15). La Coruña (Spain), 25th to 27th March, 2015.

[04] Farmer C, Hines P, Dowds J, Blumsack S. *Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure*, 43rd Hawaii international conference on system sciences, pp. 1– 10, 2010.

[05] Ranade SJ & Xu W. *An Overview Of Harmonics Modeling And Simulation*. In: IEEE Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation. 2007. Cap. 1. pp. 1-6.

[06] Lima Neta RM, Carvalho Jr, MA, Lira MMS, Gurgel Neto JM, Silva AAP. *Avaliação da Ação Conjunta de Cargas Harmônicas em Redes Elétricas Inteligentes de Distribuição*. CBA, 2016.

[07] Lira MMS, Neta RML, Carvalho Jr, MA, Souza AG, Matias IR, Lopes JAE, Costa SM. *Influência da Condutância Transversal na Impedância Harmônica Equivalente do Sistema*. SBSE – 2014.

[08] Gonzalez ML. *Estimativa de Distorções Harmônicas Geradas por Consumidores Residenciais*. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, 21-25 de Agosto de 2006, Belo Horizonte, MG.

[09] Nunes RV. *Análise da Penetração Harmônica em Redes de Distribuição Desequilibradas Devido às Cargas Residenciais e Comerciais com a Utilização do ATP*. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007. Dissertação de Mestrado – CPDEE/ Universidade Federal de Minas Gerais.

[10] Lira MMS, Neta RML, Carvalho Jr, MA, Souza AG, Pessoa LL, Lopes JAE, Costa SM. *Análise dos Impactos do Carregamento de Veículos Elétricos na Qualidade de Energia – Estudo de Caso: Ilha de Fernando de Noronha*. CITENEL – 2015.

[11] Brasil. ANEEL, PRODIST, Módulo 8, 2016.