

Avaliação de uma Rede de Distribuição Inteligente diante de Desequilíbrios e Afundamentos de Tensão

REGINA M. LIMA NETA
CENTRO UNIVERSITÁRIO CESMAC
regina.mlneta@gmail.com

ALEXSANDRO A. P. SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
alexsandro.aleixo@yahoo.com

JOSÉ M. GURGEL NETO
CENTRO UNIVERSITÁRIO CESMAC
neto.gurgel.moraes@gmail.com

JOBSON A. NASCIMENTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
job.nascimento@gmail.com

ADI N. ROCHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO CESMAC
adieletrica@gmail.com

Resumo — Este trabalho tem como objetivo de analisar o efeito de uma rede de distribuição com desequilíbrio e nível de tensão estipulados pela ANEEL quando da inserção de um conjunto de cargas harmônicas que compõem uma rede inteligente. Foi estudado um alimentador típico de 13,8 kV e considerou-se a contribuição harmônica de cargas de consumidores residenciais e comerciais, veículos elétricos e geração distribuída solar fotovoltaica. A simulação foi feita através de modelagem no software ATPDraw, em que foram definidos quatro cenários para avaliação.

Palavras-chaves — Qualidade de Energia, Geração Distribuída, Afundamento de Tensão, Geração Solar Fotovoltaica.

I. 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].

Os sistemas de distribuição são tipicamente projetados para terem características passivas. Isto, em geral, supõe um fluxo unidirecional de energia, partindo dos transformadores das subestações até as unidades consumidoras, localizadas ao longo dos alimentadores [1].

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].

A aposta na mobilidade elétrica, principalmente em veículos elétricos (VEs), representa um novo desafio de transporte tendo por base a preocupação com um modelo que seja eficiente e sustentável [4]. Além disso, a penetração dos VEs no sistema elétrico pode ocasionar sobrecarga em transformadores e redes de distribuição, dependendo do momento e forma da recarga e da demanda do sistema elétrico, além de representar uma fonte de corrente harmônica através dos conversores nos carregadores.

A inserção dos VEs e das GDs em conjunto com as cargas eletrônicas dos consumidores representa um novo desafio para o sistema de energia elétrica, especialmente para a rede de distribuição, onde ambos estarão diretamente conectados. O objetivo deste trabalho é analisar o sistema elétrico quando da ocorrência de desequilíbrio de tensão e de afundamento de tensão, fatores que frequentemente ocorrem nas redes de distribuição.

O afundamento de tensão é classificado como sendo uma redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 pu durante um intervalo de tempo. Sua intensidade está relacionada com a impedância do sistema e também com a impedância entre o ponto de curto-circuito e o de monitoração do afundamento [5]. Pode ser causado através da energização de transformadores, partida de grandes motores, descargas atmosféricas e principalmente por curto-circuito na rede [6].

É notório que os transformadores de distribuição quase sempre operam em condição de sobrecarga, resultando em afundamentos de tensão de regime permanente, pois, a presença de reguladores de tensão ainda é escassa em toda a extensão dos alimentadores.

Sendo assim, este trabalho se propõe a dar continuidade a pesquisa iniciada por [7], acrescentando-se o afundamento da tensão, como fator a ser amplificado pela presença de

correntes harmônicas na análise da qualidade de energia do alimentador.

II. MODELAGEM DO ALIMENTADOR

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 [8].

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 Fig. 1.

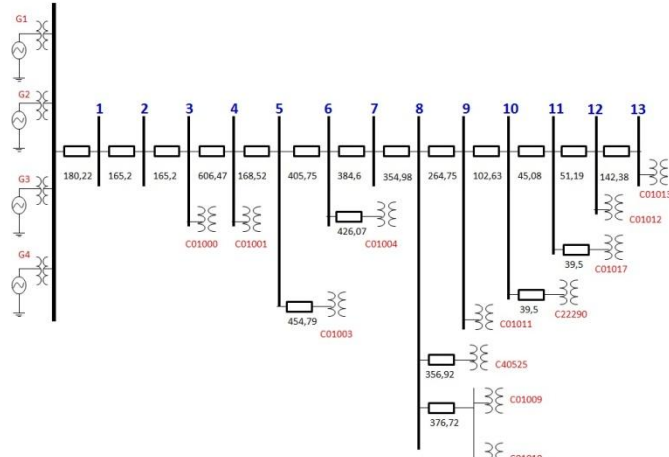


Fig. 1. Diagrama Unifilar do Alimentador 13,8 kV.

A. Linhas de Distribuição

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

Tabela I - Parâmetros das Linhas de Distribuição da IFN

Tipo de Cabo	Sequencia	R (Ω /km)	X_L (Ω /km)	S (μ mh/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	

B. 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 ou igual a 10% [9].

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 [10].

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 Fig. 2.

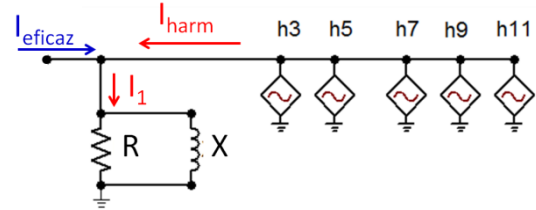


Fig. 2. Modelo da carga harmônica

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].

C. Geração Distribuída

A geração distribuída do alimentador analisado constitui-se de um gerador solar fotovoltaico com capacidade 400 kWpico e conectada à rede de distribuição. O diagrama unifilar da usina no ponto de conexão é ilustrado na Fig. 3.

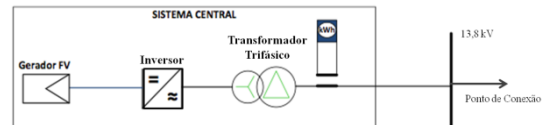


Fig. 3. Esquema Básico da Central Solar

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 [8].

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

Tabela II. Perfil Harmônico da Usina Fotovoltaica

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (°)
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		

D. Veículos Elétricos

Para representar a injeção harmônica na rede elétrica através de veículos elétricos, utilizou-se a modelagem feita por [7].

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 III.

Tabela III. Perfil Harmônico do Veículo Elétrico

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (°)
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		

Deve-se levar em consideração, que a emissão de harmônicos considerada neste estudo, pode variar bastante dentre os fabricantes de veículos, uma vez que depende muito da qualidade construtiva dos carregadores. O modelo utilizado foi resultado de pesquisas científicas em conjunto com dados de uma marca popular.

III. METODOLOGIA

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 equilibrada, sem afundamento de tensão na rede elétrica e desconsiderando-se as cargas harmônicas, GD e veículos elétricos.
- Cenário 2: Tensão de alimentação equilibrada, sem afundamento de tensão na rede elétrica e considerando-se as cargas harmônicas, GD e veículos elétricos.
- Cenário 3: Tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2%, sem afundamento de tensão na rede elétrica e considerando-se as cargas harmônicas, GD e veículos elétricos.
- Cenário 4: Tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2% , com afundamento de tensão na rede elétrica de 5% e considerando-se as cargas harmônicas, GD e

veículos elétricos.

Foi considerado um quantitativo de 50 VEs inseridos ao longo do alimentador. A geração distribuída foi conectada na barra 13.

O desequilíbrio de tensão foi inserido 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 (1).

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

Em que, V_+ é a tensão de sequência positiva e V_- a tensão de sequência negativa. Considerando o que preconiza o PRODIST, o desequilíbrio máximo permitido para redes de distribuição é de 2% [11].

O afundamento de tensão foi inserido através de sobrecarga nos secundários dos transformadores de distribuição, nas barras 8, 10, 11 e 12. Considerando-se o limite estipulado pela ANEEL para sistemas de distribuição de 0,95 pu [11].

IV. RESULTADOS

Analizou-se as tensões nas 13 barras do alimentador, no lado de média tensão para cada um dos quatro cenários.

A. Cenário 1

O perfil de tensão ao longo do alimentador, com alimentação equilibrada, desconsiderando-se os elementos harmônicos, pode ser visto na Tabela IV.

Tabela IV. Tensões nas barras do alimentador – Cenário 1

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V _{pico} (V)	V _{pu}	V _{pico} (V)	V _{pu}	V _{pico} (V)	V _{pu}
1	11180	0,99	11150	0,99	11120	0,99
2	11170	0,99	11140	0,99	11120	0,99
3	11160	0,99	11140	0,99	11120	0,99
4	11150	0,99	11140	0,99	11110	0,99
5	11150	0,99	11140	0,99	11110	0,99
6	11150	0,99	11140	0,99	11110	0,99
7	11150	0,99	11120	0,99	11110	0,99
8	11150	0,99	11120	0,99	11100	0,99
9	11130	0,99	11120	0,99	11100	0,99
10	11130	0,99	11120	0,99	11100	0,99
11	11130	0,99	11120	0,99	11100	0,99
12	11130	0,99	11110	0,99	11100	0,99
13	11130	0,99	11110	0,99	11100	0,99

Observa-se que, nas três fases, a tensão permanece dentro da faixa estipulada pelo PRODIST, entre 0,95 pu e 1,05 pu, como também pode ser visto na Fig. 4.



Fig. 4. Tensões nas Barras – Cenário 1

B. Cenário 2

Ao incluir a contribuição harmônica dos consumidores conectados na rede, o conversor da GD e os carregadores dos VEs, o perfil de tensão ao longo do alimentador, com alimentação equilibrada pode ser visto na Tabela V.

Tabela V. Tensões nas barras do alimentador – Cenário 2

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	V_{pu}	V_{pico} (V)	V_{pu}	V_{pico} (V)	V_{pu}
1	10610	0,94	10690	0,95	10570	0,94
2	10610	0,94	10680	0,95	10560	0,94
3	10600	0,94	10680	0,95	10550	0,94
4	10570	0,94	10640	0,94	10510	0,93
5	10560	0,94	10630	0,94	10510	0,93
6	10540	0,94	10620	0,94	10480	0,93
7	10530	0,93	10600	0,94	10470	0,93
8	10510	0,93	10590	0,94	10450	0,93
9	10500	0,93	10580	0,94	10440	0,93
10	10500	0,93	10580	0,94	10440	0,93
11	10500	0,93	10580	0,94	10440	0,93
12	10500	0,93	10580	0,94	10440	0,93
13	10500	0,93	10570	0,94	10440	0,93

Verifica-se que a ação conjunta das correntes harmônicas resulta no afundamento de tensão no lado de média tensão do alimentador, resultando em decréscimo de 7% nas fases A e C e 6% na fase B.

O gráfico mostrando a redução no valor das tensões em virtude da presença de harmônicos pode ser observado na Fig. 5.



Fig. 5. Tensões nas Barras – Cenário 2

Nota-se que os harmônicos fazem com que a tensão fase C reduza 6% de seu valor nominal, o que representa preocupação sobre o desempenho desse alimentador e sobre os consumidores conectados ao mesmo.

C. Cenário 3

A análise do sistema com tensão de alimentação com desequilíbrio de 2% e sem afundamento na rede elétrica, considerando todas as cargas harmônicas definidas neste estudo, resultou no perfil de tensão mostrado na Tabela VI.

Tabela VI. Tensões nas barras 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

As tensões nas fases A, B e C nas treze barras do alimentador podem ser observadas na Fig. 6.

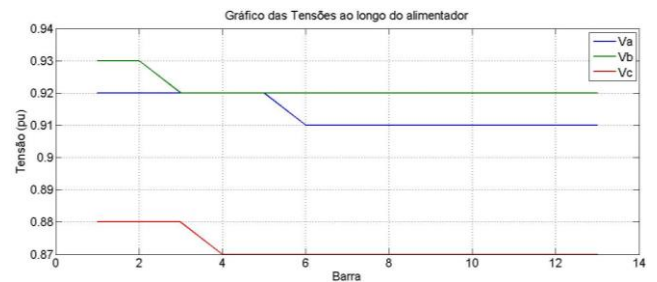


Fig. 6. Tensões nas Barras – Cenário 3

Nota-se que, com o desequilíbrio de tensão de 2%, as tensões nas barras infligem o limite de 5% estipulado pela ANEEL. Verifica-se que a ação conjunta das correntes harmônicas resulta em minimização da tensão no alimentador, em que a fase A apresentou tensão 9% mais baixa no final da rede, enquanto a fase B apresentou redução de 6% e a fase C apresentou o menor módulo de tensão de 13%.

O desempenho da fase C pode ser explicado, pois, quando da inserção de veículos, considerou-se 40% do total de veículos, neste caso 50 unidades, conectados a essa fase, e 30% nas outras duas fases. No entanto, verifica-se que as diversas cargas harmônicas, contribuem para que haja um maior desequilíbrio na rede elétrica, principalmente nos pontos mais afastados da subestação.

D. Cenário 4

A análise do sistema com tensão de alimentação com desequilíbrio de tensão de 2% e com afundamento de tensão na rede elétrica de 5%, considerando todas as cargas harmônicas definidas neste estudo, resultou no perfil de tensão mostrado na Tabela VII.

Tabela VII. Tensões nas barras do alimentador – Cenário 4

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 nas treze barras, pode ser observado na Fig. 7.



Fig. 7. Tensões nas Barras – Cenário 4

Conforme esperado, em uma rede elétrica com afundamento de tensão devido a sobrecargas, o efeito das cargas harmônicas, tende a maximizar essa diminuição, além de contribuir para que haja um maior desequilíbrio entre as fases.

As fases A e B apresentaram tensão 10% mais baixa no final da rede e a fase C apresentou o menor módulo de tensão, com uma redução de 13%.

Com a análise dos Cenários 2, 3 e 4, nota-se que as cargas harmônicas comprometem o desempenho da fase C, denotando a necessidade de um estudo mais aprofundado.

V. CONCLUSÕES

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.

Na pior situação analisada, caso do Cenário 4, observou-se que em uma rede com o mínimo de tensão permitido pela legislação de 0,95 pu e também com a máxima defasagem permitida entre as fases de 2%, os harmônicos advindos das diversas cargas adotadas, comprometem a qualidade da energia em seus níveis de tensão.

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

VI. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] REIS, Lineu Belico dos. Geração de Energia Elétrica. 2.ed. Barueri/ SP: Manole, 2011.
- [3] GOMES, J. P. R., BOAVENTURA, W. C., SILVA, S. R., CARDOSO, E. N., 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.
- [4] MONTEIRO, V. D. F. Desenvolvimento de sistemas de carregamento bidirecionais para veículos elétricos com novos modos de operação para Smart Grids. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. 2016.
- [5] SARMIENTO, H.; ESTRADA, E. A. Voltage Sag Study in an Industry With Adjustable Speed Drives. IEEE Industry Applications Magazine, 1996.
- [6] LEBORGNE, R. C. Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamento de Tensão. Dissertação

de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI), Itajubá/MG, 2003. Carlos/SP, 2014.

- [7] LIMA NETA, R. M., CARVALHO JR., M. A., LIRA, M. M. S., GURGEL NETO, J. M., SILVA, A. A. P. Avaliação da Ação Conjunta de Cargas Harmônicas em Redes Elétricas Inteligentes de Distribuição. CBA, 2016.
- [8] LIRA, M. M. S., NETA, R. M. L., CARVALHO JR., M. A., SOUZA, A. G., PESSOA, L. L., LOPES J. A. e COSTA, S. M.. Análise dos Impactos do Carregamento de Veículos Elétricos na Qualidade de Energia – Estudo de Caso: Ilha de Fernando de Noronha. CITENEL – 2015.
- [9] GONZALEZ, M. L. 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.
- [10] NUNES, R. V.. “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.
- [11] ANEEL, PRODIST, Módulo 8, 2016.