



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE ADMITÂNCIAS DO SIN OBJETIVANDO POSSÍVEIS APRIMORAMENTOS NOS ESTUDOS DE DESEMPENHO HARMÔNICO

**SERGIO LUIS VARRICCHIO (1); FRANKLIN CLEMENT VELIZ (1); CRISTIANO DE OLIVEIRA COSTA (1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - CEPEL (1)**

RESUMO

Neste trabalho, é apresentada uma investigação técnica prospectiva, objetivando tornar os estudos de desempenho harmônico de fontes renováveis menos conservadores, substituindo as contingências de componentes do sistema por variações nos seus parâmetros físicos. As análises das sensibilidades (variações) das admitâncias harmônicas do SIN vistas do PAC em relação aos parâmetros dos componentes, e o consequente efeito nas máximas distorções de tensão, objetivam simular possíveis erros ou alterações nos dados elétricos destes componentes e/ou inexatidões nos seus modelos. Além disto, estas sensibilidades visam inferir eventuais evoluções da Rede Básica do SIN que, eventualmente, podem ocorrer em anos posteriores aos dos cenários considerados.

PALAVRAS-CHAVE

Procedimentos de Rede, Sensibilidades de Admitâncias, Estudos de Desempenho Harmônico, Ponto de Acoplamento Comum (PAC), Distorções Harmônicas de Tensão.

1.0 INTRODUÇÃO

Atualmente, existem diversos equipamentos e cargas não lineares no Sistema Interligado Nacional (SIN) que podem provocar problemas relacionados à qualidade de energia. Como exemplos importantes destes equipamentos, pode-se citar as fontes renováveis de energia (eólica e solar fotovoltaica). Apesar de seu papel fundamental para o suprimento de energia, esses equipamentos podem contribuir para as distorções harmônicas de tensão no SIN. Idealmente, as formas de ondas de tensão que alimentam os componentes do sistema devem ser senoides puras. Os harmônicos, por sua vez, provenientes de uma forma de onda distorcida, aumentam as perdas, modificam o comportamento desejado da operação e reduzem a vida útil dos componentes elétricos (projetados para operarem com tensão senoidal) alimentados pelo sistema.

Para reduzir estes problemas, existem limites toleráveis, estabelecidos nos Procedimentos de Rede (PR) pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), para as distorções harmônicas de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre uma nova instalação (novo acessante) e o SIN. Quando estes limites são ultrapassados, há a necessidade de uma solução de filtragem destes harmônicos, que pode ser realizada utilizando-se filtros passivos ou ativos [1].

De maneira geral, pode-se dizer que os PR são um conjunto de regras que objetiva imprimir segurança e maior confiabilidade ao SIN e, por esta razão, tendem a ter um determinado nível de conservadorismo. Este conservadorismo, nos PR relativos a harmônicos, em particular às fontes renováveis, tem resultado em diversas solicitações por parte dos novos acessantes à Rede Básica do SIN no sentido de reduzi-lo. Deve-se observar, no entanto, que o ONS tem se mostrado sensível a estas solicitações e à necessidade do contínuo melhoramento do processo de gerenciamento da emissão de harmônicos por estes tipos de empreendimentos. Uma amostra desta preocupação com o aperfeiçoamento dos PR é a emissão da Nota Técnica [2] em complemento ao submódulo 2.9 relativo à qualidade de energia elétrica. Esse novo documento procura flexibilizar os PR de forma a atender às constantes reivindicações dos agentes no sentido de tornar a forma de avaliação dos estudos de desempenho harmônico de fontes renováveis menos conservadora. Dentre as implementações inseridas no novo documento, destaca-se a possibilidade de se utilizar, além dos setores angulares, polígonos de n lados [3] para a representação dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias do SIN.

Neste informe técnico (IT), é apresentado uma investigação prospectiva, objetivando tornar os estudos de desempenho harmônico de fontes renováveis menos conservadores. Um método para cálculo das máximas

distorções harmônicas de tensão, baseado nas sensibilidades das admitâncias do SIN vistas do PAC, é proposto e comparado com o método adotado nos PR.

Além das análises de sensibilidades, neste IT é apresentada uma breve discussão sobre as implicações em se adotar métodos menos conservadores nos estudos de desempenho harmônico de fontes renováveis de energia.

2.0 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

Para facilidade de entendimento, além do método proposto, o método adotado nos PR também é descrito nesta seção.

1. Método adotado nos PR (MPR): de acordo com os PR, os estudos de acesso de fontes renováveis de energia exigem, para o cálculo das máximas distorções harmônicas de tensão, a construção de LGs de admitâncias do SIN vistas do PAC, com o formato de setores circulares ou de polígonos de n lados. No cálculo destas admitâncias, além da rede íntegra, deve-se contingenciar todos os componentes do sistema até a terceira vizinhança do PAC. Além disto, para o traçado do polígono de n lados para a frequência harmônica f_h (neste trabalho não será considerada a representação de LGs por setores angulares), deve-se considerar o intervalo de $f_h - 0.5f_0$ até $f_h + 0.5f_0$ com passo $\Delta f_h = 6$ Hz, sendo f_0 a frequência fundamental (60 Hz). A razão de se utilizar estas frequências inter-harmônicas na construção dos polígonos é considerar possíveis erros nos dados elétricos dos componentes do SIN [4].
2. Método da variação de parâmetros (MVP): substituição das contingências por variações nos parâmetros físicos (comprimento de linhas de transmissão, susceptância de bancos de capacitores e impedâncias de transformadores, geradores e bancos de indutores) dos componentes do SIN até a terceira vizinhança do PAC. A consideração de inter-harmônicos na construção dos polígonos de n lados é mantida.

Estas análises de sensibilidades (variações) das admitâncias harmônicas do SIN vistas do PAC em relação aos parâmetros dos componentes, e o consequente efeito nas máximas distorções de tensão, objetivam simular possíveis erros ou alterações nos dados elétricos destes componentes e/ou inexatidões nos seus modelos. Além disto, estas sensibilidades visam inferir eventuais evoluções da Rede Básica do SIN que, eventualmente, podem ocorrer em anos posteriores aos dos cenários considerados.

3.0 CARACTERÍSTICAS DOS NOVOS EMPREENDIMENTOS (ACESSANTES)

Nas análises de sensibilidades das admitâncias harmônicas do SIN vistas do PAC, foram considerados dois novos empreendimentos reais, de forma a verificar o efeito destas sensibilidades nas máximas distorções de tensão. Os empreendimentos consistem em um Complexo Eólico (CE) e um Complexo Fotovoltaico (CF). As principais características destes acessantes estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos novos empreendimentos

Nome do Empreendimento	Nº da Barra do PAC	Modelo do Aerogerador (CE) / Inversor (CF)	Potência (MW)	Nº de Aerogeradores (CE) / Inversores (CF)	Nº de Parques	Capacidade Instalada (MW)
CE	6107 (230 kV)	GAMESA G97 60 Hz	2.0	90	6	180
CF	1569 (138 kV)	GENERAL ELECTRIC (GE) LV5 1510 60 Hz	1.0	329	11	329

4.0 CENÁRIOS DO SIN

Os nomes dos trinta e três cenários do SIN utilizados neste trabalho, obtidos do Plano de Ampliações e Reforços – PAR do ONS, bem como os números de componentes que cada um possui até as terceiras vizinhanças das barras do PAC dos dois empreendimentos (CE e CF), estão apresentados na Tabela 2. Como será visto no item 5.0, estes números são importantes para se saber a quantidade de casos processados nas diversas análises de sensibilidades realizadas neste IT.

Tabela 2: Nomes dos cenários do SIN e números de componentes até as terceiras vizinhanças das barras do PAC

Cenário	Nº de componentes até a 3ª vizinhança do PAC		Cenário	Nº de componentes até a 3ª vizinhança do PAC	
	CE	CF		CE	CF
2020 – 2021 LEVE VERÃO	62	55	2023 PESADA INVERNO	60	64
2020 – 2021 MÉDIA VERÃO	61	55	2023 – 2024 LEVE VERÃO	63	63
2020 – 2021 PESADA VERÃO	60	55	2023 – 2024 MÉDIA VERÃO	62	64
2021 LEVE INVERNO	59	57	2023 – 2024 PESADA VERÃO	62	63
2021 MÉDIA INVERNO	60	58	2024 LEVE INVERNO	65	68
2021 PESADA INVERNO	60	58	2024 MÉDIA INVERNO	65	71
2021 – 2022 LEVE VERÃO	60	60	2024 PESADA INVERNO	64	69
2021 – 2022 MÉDIA VERÃO	57	60	2024 – 2025 LEVE VERÃO	63	68
2021 – 2022 PESADA VERÃO	58	59	2024 – 2025 MÉDIA VERÃO	62	69
2022 LEVE INVERNO	62	63	2024 – 2025 PESADA VERÃO	62	69
2022 MÉDIA INVERNO	62	65	2025 LEVE INVERNO	64	68
2022 PESADA INVERNO	61	64	2025 MÉDIA INVERNO	64	71
2022 – 2023 LEVE VERÃO	60	63	2025 PESADA INVERNO	63	69
2022 – 2023 MÉDIA VERÃO	58	64	2025 – 2026 LEVE VERÃO	64	68
2022 – 2023 PESADA VERÃO	59	64	2025 – 2026 MÉDIA VERÃO	63	70
2023 LEVE INVERNO	61	63	2025 – 2026 PESADA VERÃO	63	69
2023 MÉDIA INVERNO	60	65	Total	2029	2111

5.0 RESULTADOS

Neste item, são comparados os resultados do MVP e do MPR. Julgou-se mais útil e proveitoso se fazer uma comparação relativa entre os valores das máximas distorções harmônicas de tensão nos PACs dos novos empreendimentos, obtidos pelos dois métodos, do que uma comparação absoluta.

Desta forma, as razões percentuais entre as máximas distorções harmônicas de tensão nos PACs do CE e do CF, obtidas pelo MVP (v_{MVP}) e pelo MPR (v_{MPR}), estão apresentadas na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente. Nestas tabelas, foram considerados cinco percentuais de variação nos parâmetros (comprimento de LTs, susceptância de bancos de capacitores e impedâncias de transformadores, geradores e bancos de indutores) dos componentes do SIN até a terceira vizinhança do PAC.

O número de casos executados pelo programa HarmZs do CEPEL [5], exigido pelo MVP, é dado por:

$$N_{MVP} = 2 \times (N_{comp} + N_{cen}) \times N_f \times N_{pv} \quad (1)$$

onde N_{comp} , N_{cen} , N_f e N_{pv} denotam, respectivamente, os números de componentes até a terceira vizinhança do PAC (2029 para o CE e 2111 para o CF), de cenários (33), de frequências para cálculo das admitâncias (131) e de percentuais de variação dos parâmetros dos componentes até a terceira vizinhança do PAC (5). A multiplicação por 2 é para considerar o uso de variações positivas e negativas.

Para o MPR, este número é dado por:

$$N_{MPR} = (N_{comp} + N_{cen}) \times N_f \quad (2)$$

Desta forma, os números totais de casos ($N_{MVP} + N_{MPR}$), necessários para construir a Tabela 3 e a Tabela 4, são dados, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} N_{TAB(3)} &= 2\,971\,342 \\ N_{TAB(4)} &= 3\,089\,504 \end{aligned} \quad (3)$$

ou seja, em torno de três milhões de casos para cada tabela. Deve-se observar que o processamento desta enorme quantidade de casos só é possível graças aos métodos e ferramentas para aumento da eficiência computacional, automatização de procedimentos e visualização de resultados em estudos de comportamento harmônico, implementados no HarmZs [6], [7].

Tabela 3: Razão entre as máximas distorções harmônicas de tensão no PAC do CE, obtidas pelo MVP e pelo MPR

Ordem (h)	f (Hz)	Razão entre as máximas distorções (%) (v_{MVP}/v_{MPR}) \times 100 %				
		$\pm 10 \%$	$\pm 20 \%$	$\pm 30 \%$	$\pm 40 \%$	$\pm 50 \%$
2	120	34.38	35.42	37.50	39.58	41.67
3	180	44.74	47.37	50.00	52.63	53.95
4	240	42.42	46.97	51.52	56.06	59.09
5	300	58.00	64.00	68.00	72.00	74.00
6	360	83.72	86.05	88.37	88.37	90.70
7	420	60.00	62.86	65.71	68.57	68.57
8	480	21.62	29.73	39.19	50.00	60.81
9	540	83.33	83.33	83.33	83.33	100.00
10	600	80.00	100.00	120.00	120.00	120.00
11	660	50.00	50.00	60.00	80.00	80.00
12	720	26.32	36.84	36.84	42.11	52.63
13	780	40.00	46.67	53.33	60.00	66.67
14	840	70.97	74.19	74.19	77.42	77.42
15	900	87.50	87.50	87.50	87.50	87.50

Tabela 4: Razão entre as máximas distorções harmônicas de tensão no PAC do CF, obtidas pelo MVP e pelo MPR

Ordem (h)	f (Hz)	Razão entre as máximas distorções (%) (v_{MVP}/v_{MPR}) \times 100 %				
		$\pm 10 \%$	$\pm 20 \%$	$\pm 30 \%$	$\pm 40 \%$	$\pm 50 \%$
2	120	73.81	76.19	76.19	78.57	78.57
3	180	71.43	73.81	73.81	73.81	73.81
4	240	60.00	62.22	64.44	64.44	66.67
5	300	53.57	57.14	53.57	57.14	57.14
6	360	38.46	42.31	46.15	50.00	53.85
7	420	79.38	83.51	87.63	90.72	93.81
8	480	59.46	67.57	75.68	81.08	83.78
9	540	57.58	69.70	78.79	81.82	84.85
10	600	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
11	660	80.00	80.00	80.00	80.00	100.00
12	720	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

13	780	75.00	75.00	100.00	100.00	100.00
14	840	66.67	83.33	83.33	83.33	83.33
15	900	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Uma outra forma de se verificar o nível de conservadorismo de um método em relação a outro é por meio da razão entre as correntes de Norton que devem ser utilizadas nestes métodos (i_{MVP} para o MVP e i_{MPR} para o MPR) para que produzam os mesmos valores de máximas distorções harmônicas de tensão no PAC. Estas razões estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6, para o CE e o CF, respectivamente.

Tabela 5: Razão entre as correntes de Norton do CE, utilizadas no MVP e no MPR, que produzem os mesmos valores de máximas distorções harmônicas de tensão no seu PAC

Ordem (h)	f (Hz)	Razão entre as correntes de Norton i_{MVP}/i_{MPR}				
		± 10 %	± 20 %	± 30 %	± 40 %	± 50 %
2	120	2.91	2.82	2.67	2.53	2.40
3	180	2.24	2.11	2.00	1.90	1.85
4	240	2.36	2.13	1.94	1.78	1.69
5	300	1.72	1.56	1.47	1.39	1.35
6	360	1.19	1.16	1.13	1.13	1.10
7	420	1.67	1.59	1.52	1.46	1.46
8	480	4.63	3.36	2.55	2.00	1.64
9	540	1.20	1.20	1.20	1.20	1.00
10	600	1.25	1.00	0.83	0.83	0.83
11	660	2.00	2.00	1.67	1.25	1.25
12	720	3.80	2.71	2.71	2.38	1.90
13	780	2.50	2.14	1.88	1.67	1.50
14	840	1.41	1.35	1.35	1.29	1.29
15	900	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14

Tabela 6: Razão entre as correntes de Norton do CF, utilizadas no MVP e no MPR, que produzem os mesmos valores de máximas distorções harmônicas de tensão no seu PAC

Ordem (h)	f (Hz)	Razão entre as correntes de Norton i_{MVP}/i_{MPR}				
		± 10 %	± 20 %	± 30 %	± 40 %	± 50 %
2	120	1.35	1.31	1.31	1.27	1.27
3	180	1.40	1.35	1.35	1.35	1.35
4	240	1.67	1.61	1.55	1.55	1.50
5	300	1.87	1.75	1.87	1.75	1.75
6	360	2.60	2.36	2.17	2.00	1.86
7	420	1.26	1.20	1.14	1.10	1.07
8	480	1.68	1.48	1.32	1.23	1.19
9	540	1.74	1.43	1.27	1.22	1.18
10	600	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	660	1.25	1.25	1.25	1.25	1.00

12	720	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13	780	1.33	1.33	1.00	1.00	1.00
14	840	1.50	1.20	1.20	1.20	1.20
15	900	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

6.0 CONCLUSÕES

Como se observa nos resultados apresentados, o MVP proposto apresenta menor nível de conservadorismo do que o MPR, principalmente para os harmônicos de baixa ordem, mesmo considerando uma variação de $\pm 50\%$ nos parâmetros físicos dos componentes do SIN até a terceira vizinhança do PAC. Considerando, por exemplo, o harmônico de 5ª ordem, que é o mais presente no SIN, o MVP $\pm 50\%$ apresentou valores de máximas distorções de tensão de 74 % (Tabela 3) e de 57.14 % (Tabela 4) dos valores apresentados pelo MPR para o CE e CF, respectivamente. Isto representa razões de 1.35 (Tabela 5) e 1.75 (Tabela 6) entre as correntes de Norton que devem ser aplicadas no MVP e no MPR para que produzam os mesmos valores de máximas distorções de tensão de 5ª harmônico nos PACs do CE e do CF, respectivamente. Esta característica de menor nível de conservadorismo também é observada para outras ordens harmônicas, incluindo aquelas de maior interesse prático, como a 3ª e a 7ª.

Como citado na seção Introdução, este IT é uma investigação prospectiva, sendo necessário, portanto, mais testes e aperfeiçoamentos como, por exemplo, a escolha adequada do percentual de variação dos parâmetros dos componentes da Rede Básica do SIN até a terceira vizinhança do PAC. Julga-se, no entanto, que a substituição de contingências por variações nos parâmetros dos componentes pode ser uma abordagem promissora.

Obviamente, esta mudança na forma de realizar os estudos tende a implicar em uma menor exigência quanto à instalação de filtros, mas, eventualmente, permitiria a violação dos limites de distorções harmônicas de tensão durante contingências de curta duração, o que poderia ser considerado como aceitável. Por outro lado, algumas medidas mitigadoras necessitariam ser tomadas quando houvesse a ocorrência de contingências sustentadas (longa duração), o que implicaria, por exemplo, no desligamento de algumas fontes geradoras de harmônicos do novo acessante.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. C. Véliz, S. L. Varricchio, C. O. Costa, O. A. Cunha e R. C. Amaral, "Metodologia para Redução de Tensões Harmônicas em Redes Elétricas Utilizando Filtros Ativos na Média Tensão," em *XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, PR, 2015.
- [2] ONS - Operador Nacional do Sistema, Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou aos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras - REV. 03, 2019.
- [3] F. C. Veliz, S. L. Varricchio e C. O. Costa, "Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico," em *XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Brasília (DF), 2013.
- [4] C. O. Costa, S. L. Varricchio, F. C. Véliz e F. A. Oliveira, "Desenvolvimento de Funcionalidades Computacionais para Atendimento dos Novos Procedimentos de Rede para Estudos de Desempenho Harmônico," em *XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Curitiba (PR), 2017.
- [5] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Manual de Utilização do Programa HarmZs - Versão 3.0," CEPEL, Rio de Janeiro, 2016.
- [6] C. O. Costa, S. L. Varricchio e F. C. Véliz, "Métodos e Ferramentas para Aumento da Eficiência Computacional, Automatização de Procedimentos e Visualização de Resultados em Estudos de Comportamento Harmônico," em *XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Belo Horizonte, MG, 2019.
- [7] S. L. Varricchio, C. O. Costa e F. C. Véliz, "Método de Alto Desempenho Computacional para Estudos de Impacto Harmônico de Novos Acessantes à Rede Básica," em *XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, PR, 2015.

8.0 DADOS BIBLIOGRÁFICOS



Sergio Luis Varricchio possui graduação (1987), mestrado (1994) e doutorado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade de Brasília (UnB), respectivamente. De 1987 a 1989 trabalhou na consultora Fluxo Engenharia, projetando sistemas de aterramento. De 1988 a 1989 e de 1998 a 1999 foi docente em Teoria Eletromagnética na UCP. Desde 1989 trabalha no CEPEL como pesquisador e gerente de projetos, tendo sido o idealizador do programa HarmZs, largamente utilizado no setor elétrico. Seus interesses incluem qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos e redução da ordem de modelos.



Franklin Clement Veliz possui graduação (2001) e mestrado (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.



Cristiano de Oliveira Costa recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2002. Em 2013 obteve o seu mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.