

ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS FRENTE A VARIAÇÕES DA REDE COLETORA DE UMA CENTRAL DE GERAÇÃO EÓLICA

LUÍS FERNANDO M. MACHADO, SILVIO G. DI SANTO, MAURICIO B. C. SALLES

Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo

Av Prof Luciano Gualberto, Travessa 3, nº158

E-mails: eng.luisfernando.m.machado@gmail.com, silviogiuseppe@usp.br, mausalles@usp.br

LUÍS FERNANDO M. MACHADO, SILVIO G. DI SANTO, MAURICIO B. C. SALLES

Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo

Caixa Postal 05508-010, São Paulo, SP, Brasil

E-mails: eng.luisfernando.m.machado@gmail.com, silviogiuseppe@usp.br, mausalles@usp.br

Abstract— This work aims to present a harmonic distortion sensitivity analysis voltage at the connection point of Wind Generation Center in the public grid, applying the Locus of the method recommended by the National Electric System Operator. The sensitivity analysis was performed considering variations of the lengths of the collection network cables belonging to Wind Generation Center and the transmission line responsible for connecting the Wind Generation Central to the public grid. The results show that for the base case distortion seventh harmonic voltage is 1.1960% of the rated voltage, while in case 1 the distortion harmonic voltage seventh is 4.61% of the nominal voltage.

Keywords— Locus Method, Sensitivity, Harmonic Voltage Distortion, Wind Generation Center.

Resumo— Este artigo tem como objetivo analisar a sensibilidade da distorção harmônica de tensão no ponto de conexão de uma central de geração eólica na rede básica, aplicando-se o Método do Lugar Geométrico recomendado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. A análise de sensibilidade foi realizada considerando-se as variações dos comprimentos dos cabos da rede coletora pertencente a central de geração eólica e da linha de transmissão responsável por conectar a central de geração eólica à rede básica. Os resultados mostram que para o caso base a distorção da sétima harmônica de tensão é de 1,1960% da tensão nominal enquanto que para o caso 1 a distorção é de 4,61% da tensão nominal.

Palavras-chave— Método do Lugar Geométrico, Sensibilidade, Distorções Harmônicas de Tensão, Central de Geração Eólica.

1 Introdução

A utilização da energia eólica é, ainda, recente no setor elétrico e, por isso, apresenta inúmeros desafios na operação e integração dessa nova tecnologia com o sistema elétrico. Um dos grandes desafios é o da qualidade da energia produzida.

De conformidade com o Banco de Informações de Geração disponibilizado pela ANEEL [1], o Brasil apresenta, atualmente, 355 centrais de geração eólica que já estão produzindo energia para o sistema elétrico brasileiro, totalizando uma potência outorgada de 8.673.268kW. Para o cenário futuro, o país apresenta 147 centrais de geração eólica que estão sendo construídas e, além dessas 244 cuja construção não foi iniciada, totalizando uma potência outorgada futura de 9.251.724kW.

Para cada central de geração eólica (CGE) que entrará em operação será obrigatório elaborar o estudo do impacto harmônico que cada CGE gera no sistema elétrico brasileiro. Desta forma, devido a grande quantidade de empreendimentos de geração eólica que entrarão em operação, há necessidade de se realizar pesquisas voltadas à área de qualidade de energia focadas nesse tipo de geração.

O uso da eletrônica de potência permitiu o desenvolvimento dos aerogeradores com velocidade variável. Tal tecnologia é responsável pela injeção de harmônicos de corrente na rede elétrica. Diversas pesquisas já vêm sendo desenvolvidas e retratam os harmônicos injetados por aerogeradores, como [2] - [6].

O artigo proposto aplica a metodologia do 'lugar geométrico' apresentado em [7], com o objetivo de elaborar uma análise da sensibilidade da distorção harmônica no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), frente às variações nos comprimentos dos cabos da rede coletora e da linha de transmissão que conecta a CGE à rede básica, de forma a complementar os trabalhos de [2] e [3], uma vez que [2] demonstra a aplicação da metodologia do lugar geométrico e [3] elabora um estudo de sensibilidade em função do nível de curto circuito no PAC.

Este estudo foi dividido em cinco seções. Na seção dois explica-se a metodologia do 'lugar geométrico'. Na seção três mostra-se a aplicação da metodologia em uma CGE de teste conectada à barra de João Câmara II. Em continuidade, na seção quatro, elaborase o estudo de sensibilidade da distorção harmônica no PAC, considerando-se variações no comprimento dos cabos da rede coletora da CGE, bem como no comprimento da linha de transmissão

que conecta a CGE à rede básica. Por fim, na seção cinco apresenta-se a conclusão.

2 Metodologia

O método do ‘lugar geométrico’ (LG) é recomendado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) [7] para os estudos do comportamento harmônico dos novos acessos à rede básica que, possuam cargas não lineares significativas, sua finalidade é encontrar o máximo valor possível da distorção harmônica no PAC.

Este método caracteriza-se pela aplicação de um equivalente do Norton, visto a partir do ponto de acoplamento comum (PAC), conforme ilustra a Figura 1. Onde $[Y_i(h)]$ representa a admitância equivalente da rede interna, vista do PAC, enquanto, que $[Y_e(h)]$ representa o ‘lugar geométrico’ das admitâncias equivalentes da rede externa, vistas do PAC. Conhecida como fonte de corrente de Norton, $I(h)$ representa a fonte de corrente equivalente da rede interna, vista a partir do PAC.

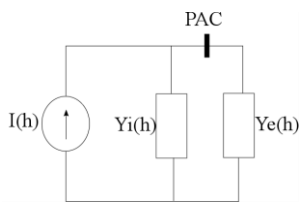


Figura 1. Circuito Equivalente de Norton a partir do Ponto de Acoplamento Comum (PAC).

A. Fonte de Corrente Harmônica $I(h)$

O valor de $I(h)$, no PAC, é calculado a partir das correntes geradas nos equipamentos não lineares, presentes na instalação. Tais valores são determinados por simulação ou medição.

Destaca-se, portanto, que os valores das correntes harmônicas, geradas por equipamentos tipo conversor, quando obtidas por simulação, devem compreender os máximos individuais por harmônico. Esses valores são normalmente informados pelo fabricante. Nos parques eólicos, existem inúmeros aerogeradores responsáveis pela emissão de correntes harmônicas.

Considerando-se, a dificuldade decorrente do estabelecimento dos ângulos, entre as correntes geradas por diferentes fontes, para uma mesma ordem harmônica, a corrente resultante poderá ser obtida por meio da equação (1) proposta pela norma IEC 61000-3-6:

$$I_{h,total} = \left[\sum_{i=1}^N (I_{h,i})^a \right]^{\frac{1}{a}} \quad (1)$$

Onde:

h é a ordem harmônica;

N é o número total de turbinas eólicas;

$I_{h,i}$ é a corrente harmônica no Ponto de Acoplamento Comum gerada pela i -ésima fonte harmônica;

a é o coeficiente que depende da ordem harmônica conforme mostra a Tabela 1;

Tabela 1. Coeficiente “ a ” para o cálculo da corrente harmônica Equivalente

a	Ordem Harmônica
1	$h < 5$
1,4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$

Diferentemente da forma em que a norma IEC 6100-3-6 calcula a corrente harmônica resultante (1), [8] propõe um estudo sobre o efeito de agregação das correntes harmônicas oriundas de diferentes fontes. Em [8]-[10] foi definida para cada turbina eólica uma função de transferência H_{Tn} que relaciona a corrente equivalente da respectiva turbina obtida no PAC com a corrente medida no terminal da turbina eólica. Em [8] observa-se que os inter-harmônicos apresentam uma distribuição uniforme ao redor da origem do plano complexo, enquanto que os harmônicos em geral apresentam uma distribuição não uniforme e centralizada num ponto distinto da origem do plano complexo. De acordo com essa distribuição dos harmônicos e inter-harmônicos, [8] propõe o conceito de Função Global de Transferência que por definição é a relação entre a emissão total da CGE no PAC com a emissão individual de uma única turbina. Então [8] propõe dois métodos de cálculo para a Função Global de Transferência dependendo da distribuição dos harmônicos e inter-harmônicos no plano complexo, conforme ilustra as equações (2) e (3).

$$T_{Uniform}(f) = \sqrt{\sum_{n=1}^N |H_{Tn}(f)|^2} \quad (2)$$

$$T_{identical}(f) = \left| \sum_{n=1}^N H_{Tn}(f) \right| \quad (3)$$

B. Envelope do Lugar Geométrico Y_e

Para uma ordem harmônica qualquer ‘ h ’ o LG da admitância externa $[Y_e(h)]$ é construído por um envoltório que contém um conjunto de pontos da ordem harmônica ‘ h ’, como também, das ordens harmônicas imediatamente superiores ($h+1$) e inferiores ($h-1$).

O cálculo desse conjunto de pontos é realizado considerando-se as seguintes premissas:

- A rede coletora da CGE deve estar desconectada da rede básica;
- Análise do fluxo de potência do sistema elétrico brasileiro levando-se em conta as condições de carga leve, média e pesada para os horizontes anuais pré-estabelecidos no estudo;
- É necessário quantificar o número de gerado-

res conectados no sistema para cada condição de carga nos horizontes anuais pré-estabelecidos no estudo;

- Considerar as condições de contingência de rede que são pré-estabelecidas pelo ONS.

C. Obtenção do $Y_{\min}$

Por definição $Y_{\min}(h)$ é a menor distância entre o negativo da admitância da rede interna $-Y_i(h)$ até o envoltório do lugar geométrico da admitância da rede externa $Y_e(h)$ conforme mostra a Figura 2.

O cálculo do $Y_{\min}(h)$ é obtido pela soma vetorial do envelope de admitância da rede externa $Y_e(h)$ com o $Y_i(h)$ que é equivalente à subtração vetorial do envelope de admitância da rede externa com o negativo da admitância da rede interna da CGE, conforme mostra a equação (4).

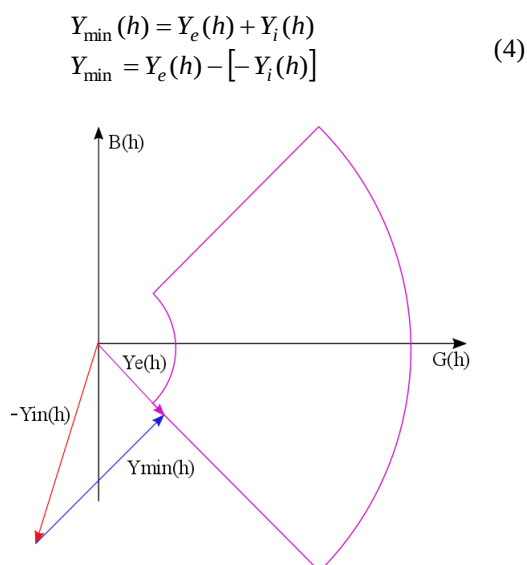


Figura 2. Método do Lugar Geométrico em vermelho é o negativo da admitância interna $[-Y_i(h)]$ e em azul é o $Y_{\min}(h)$ e em rosa é o $Y_e(h)$.

D. Cálculo da distorção harmônica máxima

Uma vez estabelecido o envelope para cada harmônica, a distorção é calculada através de (5):

$$d_{MAX}(h) = \frac{I(h)}{Y_{\min}(h)} \times 100\% \quad (5)$$

Onde $I(h)$ e $Y_{\min}(h)$ estão em pu.

Através das equações (4) e (5), pode-se observar que, quando os módulos entre $Y_e(h)$ e o negativo da admitância interna $-Y_i(h)$ estão próximos e, quanto menor for a diferença angular entre as duas grandezas, menor será o $Y_{\min}(h)$ e, conseqüentemente, maior será a distorção harmônica gerada.

E. Limites individuais das distorções harmônicas estabelecido pelo ONS

Os critérios de aceitação da nova instalação quanto aos limites individuais relacionados à distorção harmônica são apresentados pela Tabela 2, obtida de [7].

Tabela 2. Limites individuais relacionados à distorção harmônica conforme [7].

$V \geq 69\text{kV}$			
ÍMPARES		PARES	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	0,6		
		Todos	0,3
≥ 27	0,4		

3 Estudo Base da CGE

A metodologia do Lugar Geométrico será aplicada em uma central de geração eólica (CGE) conectada na SE João Câmara II 138kV. A CGE é composta por três parques eólicos, importante salientar que, o parque 3 é idêntico ao parque 2. Portanto, para simplificar o diagrama unifilar, a Figura 3 mostra apenas os parques 1 e 2 em detalhes. Para a CGE foi considerado que todas as turbinas eólicas são do tipo DFIG com potência ativa nominal de 2MW. A Tabela 3 apresenta os dados dos cabos de média tensão da rede coletora.

Tabela 3. Dados dos cabos de média tensão da rede coletora.

Seção (mm ²)	R1 Ω/km	X1 Ω/km	XC1 Ω/km
150	0,2647	0,1500	14424,765
240	0,1813	0,1376	12392,097
400	0,1017	0,1271	10236,276

No estudo de harmônicos, as turbinas eólicas são modeladas por fontes de correntes harmônicas, desta forma, os fabricantes das turbinas eólicas fornecem uma tabela da injeção de corrente harmônica em função da potência nominal da turbina. De acordo com [7], na elaboração do estudo harmônico é considerado apenas a máxima injeção de corrente harmônica para cada ordem. Por conseguinte, a Tabela 4 indica as injeções máximas de correntes harmônicas de cada ordem harmônica, emitida individualmente por cada turbina eólica, em função de sua corrente nominal de 1673A, no terminal de baixa tensão (690V).

Aplicando-se a metodologia, descrita na seção dois, obtém-se as distorções harmônicas de tensão no PAC.

A Tabela 5 mostra os valores das distorções harmônicas individuais de tensão obtida no PAC da CGE. A Figura 4 demonstra o traçado do LG da sétima harmônica, uma vez que foi a única a violar o limite de distorção estabelecido pela Tabela 2 [7].

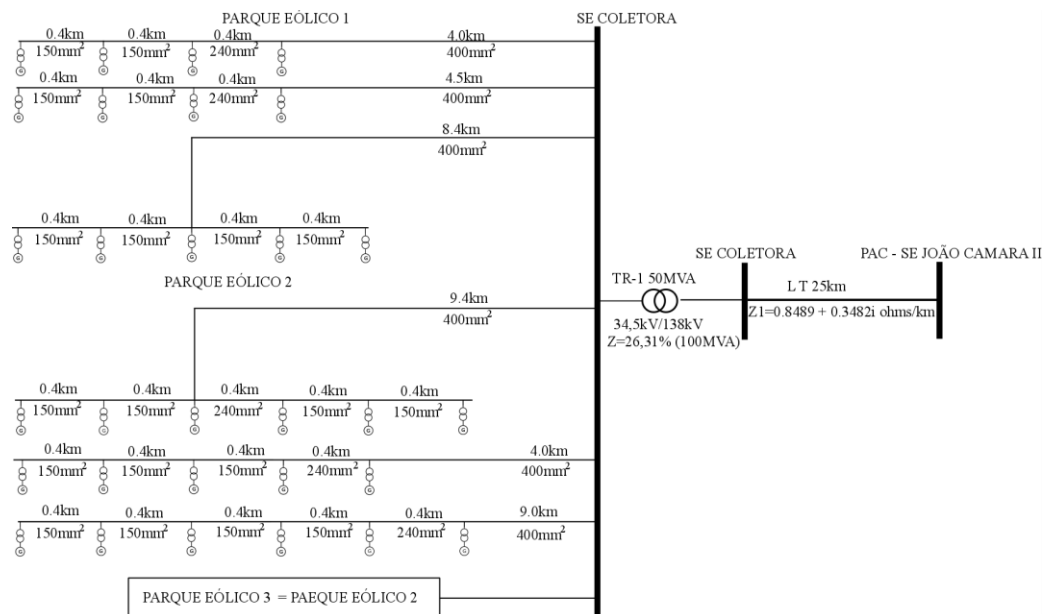


Figura 3. Unifilar da Central de Geração Eólica (CGE)

Tabela 4. Injeções máximas de correntes harmônicas de cada ordem harmônica em relação à frequência fundamental de 60Hz.

Ordem	% I_N	I [A]	Ordem	% I_N	I [A]
1	98,008	1639,674	26	0,057	0,953
2	0,183	3,061	28	0,04	0,669
4	0,137	2,292	29	0,104	1,739
5	1,085	18,152	31	0,043	0,719
7	1,255	20,996	32	0,025	0,418
8	0,105	1,756	34	0,017	0,284
10	0,07	1,171	35	0,036	0,602
11	0,377	6,307	37	0,025	0,418
13	0,332	5,554	38	0,018	0,301
14	0,077	1,288	40	0,018	0,301
16	0,04	0,669	41	0,066	1,104
17	0,122	2,041	43	0,023	0,384
19	0,155	2,593	44	0,008	0,133
20	0,107	1,790	46	0,005	0,083
22	0,117	1,957	47	0,008	0,133
23	0,273	4,567	49	0,005	0,083
25	0,095	1,589	50	0,003	0,050

Tabela 5. Distorções Harmônicas Individuais.

H	Distorção harmônica [% U_N]	H	Distorção harmônica [% U_N]
2	0,0371	28	0,0006
4	0,1405	29	0,0013
5	0,5727	31	0,0004
7	1,1960	32	0,0003
8	0,0461	34	0,0002
10	0,0177	35	0,0006
11	0,0385	37	0,0026
13	0,1142	38	0,0019
14	0,0206	40	0,0016
16	0,0005	41	0,0056
17	0,0034	43	0,0012
19	0,0119	44	0,0005
20	0,0083	46	0,0003
22	0,0012	47	0,0004
23	0,0026	49	0,0002
25	0,0007	50	0,0001
26	0,0009	THD=1,3405% U_N	

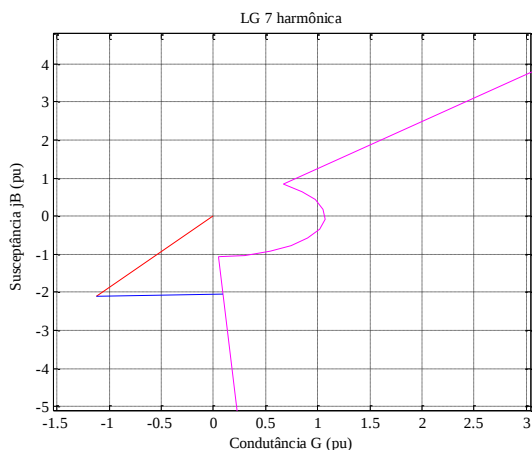


Figura 4. Lugar Geométrico 7ª harmônica $-Y_1$ (vermelho) e Y_{min} (azul).

4 Estudo de Sensibilidade

A partir da análise da CGE, proposta na seção três, aborda-se o estudo de sensibilidade da distorção harmônica frente às variações das dimensões de sua rede interna. Para isso considerou-se somente as harmônicas de ordem 4ª, 5ª, 7ª e 11ª, uma vez que estas apresentaram maior impacto no estudo de sensibilidade.

Assim, apresentam-se as descrições de vinte e dois casos a serem analisados no estudo, observando-se que as grandezas foram calculadas em valores percentuais na base de 100MVA e tensão nominal do PAC.

Caso base ou caso 0 (setor verde): caso de referência constituído pela CGE apresentada na seção três;

Caso 1 ao caso 9 (setor azul): são similares ao caso

base. Alterou-se apenas o comprimento da linha de transmissão entre 20% e 200% do comprimento da linha do caso base, com passos de 20%;

Caso 10 ao caso 18 (setor vermelho): são similares ao caso base, com alteração no comprimento dos cabos de média tensão, responsáveis por conectarem o conjunto dos aerogeradores a SE coletora. Os respectivos comprimentos dos cabos foram alterados nas ordens entre 20% e 200% em relação ao caso base, com passos de 20%;

Caso 19 ao caso 22 (setor preto): são similares ao caso base, alterando-se apenas as distâncias entre os aerogeradores entre 500m e 800m com passo de 100m.

Os resultados do estudo de sensibilidade das distorções harmônicas apresentam-se conforme os itens a seguir.

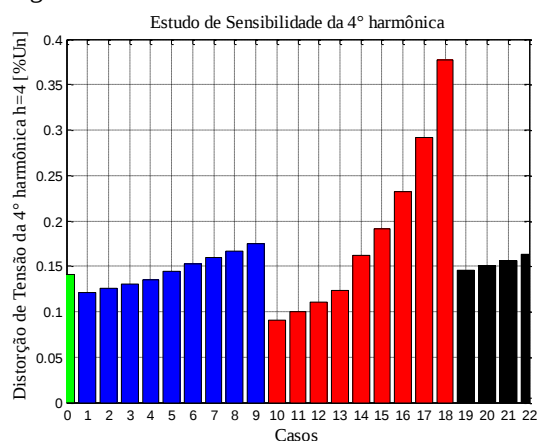


Figura 5. Estudo de Sensibilidade da 4ª harmônica.

A. Análise da sensibilidade 4ª harmônica

O estudo de sensibilidade da quarta harmônica (Figura 5) mostra para o setor azul que a distorção da quarta harmônica cresce com o aumento do comprimento da linha de transmissão, que interliga a CGE ao PAC. O mesmo comportamento da distorção harmônica ocorre para o setor preto (variação da distância entre os aerogeradores) e para o setor vermelho (variação do comprimento dos cabos que interligam o conjunto dos aerogeradores a SE Coletora), sendo que para o vermelho o crescimento da distorção é superior ao dos demais setores. Conforme ilustra a Figura 5, o caso 18 é considerado o mais severo, pois atinge um patamar de distorção equivalente a 0,37% da tensão nominal, ou seja, tornou-se o único caso a superar os limites de distorção da quarta harmônica estabelecida pelo ONS conforme a Tabela 2. Justifica-se tal comportamento decorrente da alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ que, quando somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, gera um $Y_{\min}(h)$ de módulo menor, consequentemente acaba aumentando o nível da distorção da quarta harmônica.

B. Análise da sensibilidade da 5ª harmônica

O estudo de sensibilidade da quinta harmônica (Figura 6) identificou para o setor azul que, a distor-

ção da quinta harmônica cresce com o aumento do comprimento da linha de transmissão, responsável por interligar a CGE ao PAC. Assim, o mesmo comportamento de distorção harmônica ocorre para o setor preto. O que não ocorre para o setor vermelho, visto que a distorção da quinta harmônica apresentou um comportamento ascendente do caso 10 até 16, atingindo máxima distorção da quinta harmônica, equivalente a 1,46% U_N , acima do limite estipulado pela Tabela 2.

A partir do caso 17 até o caso 18 a distorção da quinta harmônica decresce 1,17% U_N (para o caso 17) até 0,85% U_N (para o caso 18). Conforme ilustra a Figura 6, os casos 5 a 9 e 14 a 22 superaram os limites de distorção harmônica estipulados pelo ONS, conforme a Tabela 2. Para os setores azul, preto e vermelho (caso 10 ao 16) justifica-se tal comportamento decorrente da alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ que, quando somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, gera um $Y_{\min}(h)$ de módulo menor, consequentemente acaba aumentando o nível da distorção da quinta harmônica. Para o setor vermelho referente aos casos 17 a 18 ocorre o inverso, isto é, a alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, resulta em um $Y_{\min}(h)$ de maior módulo, o que acaba diminuindo o nível da distorção da quinta harmônica.

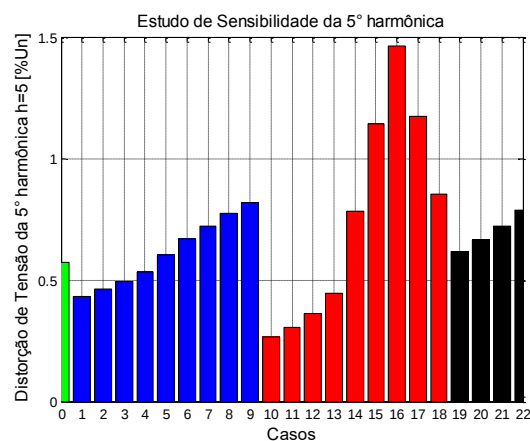


Figura 6. Estudo de Sensibilidade da 5ª harmônica.

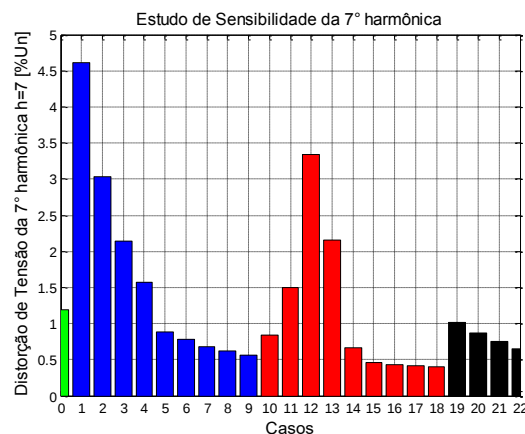


Figura 7. Estudo de Sensibilidade da 7ª harmônica.

C. Análise da sensibilidade 7ª harmônica

O estudo de sensibilidade da sétima harmônica Figura 7 mostra que, para o setor azul, a distorção de sétima harmônica diminui com o aumento do comprimento da linha de transmissão, que interliga a CGE ao PAC. A maior distorção harmônica ocorreu para o caso 1 atingindo um patamar de 4,61% U_N enquanto que para o caso 9 a distorção foi de 0,57% U_N . O mesmo comportamento de distorção harmônica ocorreu para o setor preto. O caso 1 apresentou uma variação de 285% quando comparada com a distorção da sétima harmônica obtida no caso base. O que não ocorreu para o setor vermelho, visto que, a distorção da sétima harmônica apresenta um comportamento ascendente do caso 10 até 12, atingindo, para este setor, máxima distorção da sétima harmônica equivalente a 3,35% U_N , acima do limite estipulado pela Tabela 2. A partir do caso 13 até o caso 18 a distorção da sétima harmônica decresce de 2,16% U_N para o caso 13 até 0,40% U_N para o caso 18. Conforme a Figura 7, os casos base, 1 a 8, 10 a 14 e 19 a 22 são os que superaram os limites de distorção harmônica estipulados pelo ONS, conforme a Tabela 2. Para os setores azul, preto e vermelho (caso 13 ao 18) justifica-se tal comportamento decorrente da alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ que, quando somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, gera um $Y_{min}(h)$ de módulo maior, consequentemente acaba diminuindo o nível da distorção da sétima harmônica. Para o setor vermelho referente aos casos 10 a 12 ocorre o inverso, isto é, a alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, resulta em um $Y_{min}(h)$ de menor módulo, o que acaba aumentando o nível da distorção da sétima harmônica.

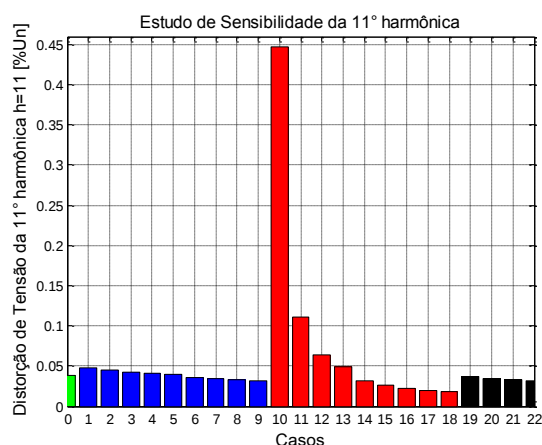


Figura 8. Estudo de sensibilidade da 11ª harmônica

D. Análise de sensibilidade da 11ª harmônica

O estudo de sensibilidade da décima primeira harmônica (Figura 8) mostrou que a distorção da décima primeira harmônica apresentou-se abaixo dos limites de distorção harmônica, estipulados pelo

ONS, conforme a Tabela 2. De forma geral, as distorções apresentaram valores poucos expressivos.

Entretanto, para o setor vermelho, o caso 10 obteve uma distorção de 0,45% U_N e, o caso 11 de 0,11% U_N , valores bem acima dos demais casos do setor vermelho. Justifica-se esse aumento, decorrente da alteração no argumento e no módulo do $Y_i(h)$ que, quando somado vetorialmente com o envelope de admitância da rede, gera um $Y_{min}(h)$ de módulo menor e, consequentemente, causa um aumento na distorção harmônica.

5 Conclusão

O estudo de sensibilidade realizado mostrou-se uma importante ferramenta na avaliação da topologia de CGEs a serem construídas. Este estudo pode ser conciliado na otimização de cabos da rede coletora, cujo objetivo, além de obter a menor quantidade de cabos, também é o de obter a menor distorção harmônica possível.

O estudo de sensibilidade mostrou, ainda, que as alterações na rede coletora têm grande impacto na distorção harmônica de tensão e cada ordem harmônica apresenta um comportamento distinto não há um padrão de comportamento estabelecido entre as harmônicas.

Referências Bibliográficas

- [1] Banco de Informações de Geração ANEEL. Site: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acessado em 27/04/2016;
- [2] C. O. Oliveira, F. C. Véliz, S. L. Varricchio, J. R. Medeiros "Avaliação do Desempenho de Cargas Não Lineares Utilizando o Programa HarmZs", XII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 20- 23 maio de 2012
- [3] S. Liu, G. Lara, S. Silvia, "Análise da Sensibilidade das Distorções Harmônicas de Usinas Eólicas em Função do Nível de Curto Circuito no PAC Utilizando a Metodologia de Lugares Geométricos do ONS" IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 15-18 maio de 2012.
- [4] A. Reis, J. C. de Oliveira, "Physical Concepts Related to Harmonics Produced by Wind Turbines Operation" IEEE Latin America Transactions, Vol 14, NO 4, abril 2016.
- [5] E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, X. Wang, C. L. Bak, "Efficient Approach for Harmonic Resonance Identification of Large Wind Power Plants" 978-1-4673-8617-3/16/ 2016 IEEE.
- [6] V. Preciado, M. Madrigal, E. Muljadi, V. Gevorgian, "Harmonics in a Wind Power Plant" 978 978-1-4673-8040-9/15 2015 IEEE
- [7] Submódulo 3.6 – Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica. Operador Nacional do Sistema (ONS), Resolução Normativa nº 372/09, Agosto, 2009.
- [8] K. Yang, M.H.J. Bollen and E.A. Larsson, "Aggregation and Amplification of Wind-Turbine Harmonic Emission in A Wind Park", IEEE Transactions on Power Delivery (in press), 2014. doi:10.1109/TPWRD.2014.2326692.
- [9] Y.Chen, M.Bollen, and M. Martins, Application of transfer function based harmonic study method to an offshore wind farm," presented at the Int. Workshop Wind Power Integr., Lisbon, Portugal, Nov.2012.
- [10] K. Yang, "Wind-turbine emissions and propagation through a wind farm" Licentiate Thesis, Lulea Univ. Technol., Skelleftea, Sweden, 2012.