

Impactos das Variações de Tensão de Curta Duração na Geração de Harmônicos por Aerogeradores Síncronos

Márcio Arvelos Moraes* José Carlos de Oliveira*

**Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Uberlândia-MG, Brasil (e-mail: marcio.arvelos@gmail.com).*

Abstract: Wind farms have a growing participation in the power generation matrices of many countries, including Brazil. Notwithstanding the constant evolution of the technologies used, the use of generation units based on induction and synchronous generators, coupled with their respective electronic conversion structures, cause, among other phenomena, interactions with power quality, including harmonic distortions. In light of this fact, the regulatory agents, through their normative standards, determine that access authorizations are only granted after the presentation and approval of the impact studies, in which the question of harmonic distortions caused in the connection networks is inserted. Also, after the commissioning of the facilities, there is still the need of post-operative studies, when databases from measurements are used and no longer from the manufacturers. Under such circumstances, significant changes in the spectral content can be verified, which can cause changes in the amplitudes of the characteristic harmonic orders, and also, in the appearance of other unforeseen frequencies, especially when the interconnection networks present with anomalies. In this scenario is the present work, which is focused on computational investigations of the generation of harmonics by structures based on synchronous generation, subject to short-term voltage variations.

Resumo: Os parques eólicos se apresentam com crescente participação nas matrizes de geração elétrica dos mais diversos países, dentre os quais o Brasil. Não obstante as constantes evoluções das tecnologias utilizadas, os complexos eólicos continuam à base dos geradores de indução e síncronos, atrelados com suas respectivas estruturas eletrônicas de conversão. Estes, dentre outros fenômenos, promovem impactos sobre os indicadores de qualidade. À luz deste fato, os agentes reguladores, através de seus documentos normativos, determinam que as autorizações aos acessos somente são concedidas após a aprovação dos estudos de impactos, em cujo cenário está inserida a questão das distorções harmônicas provocadas nas redes de conexão. Também, após o comissionamento das instalações, há ainda necessidade de estudos pós-operatórios, quando são empregados bancos de dados advindos de medições e não mais dos fabricantes. Sob tais circunstâncias, os conteúdos espectrais podem evidenciar alterações das amplitudes das ordens harmônicas características, e ainda, o surgimento de outras frequências não previstas, principalmente quando as redes de interligação se apresentam com anomalias. Neste cenário, o presente trabalho tem por meta apresentar resultados de investigações computacionais da geração de harmônicos pelas estruturas à base da geração síncrona, sujeitas a variações de tensão de curta-duração.

Keywords: PMSG wind turbines; Voltage sags; non-characteristics harmonics; VSI inverter; SPWM.

Palavras-chaves: Aerogerador PMSG; VTCD; harmônicos não-característicos; Inversor VSI; SPWM.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica está estreitamente relacionado ao desenvolvimento econômico e tecnológico de um país. Nesse sentido, as fontes de energia primárias, utilizadas para a obtenção de energia elétrica devem ser avaliadas quanto a disponibilidade, custo e eficiência, a fim de garantir o suprimento da demanda ao longo dos anos (EPE, 2019). Nesse contexto, percebe-se um grande incentivo global no que tange à utilização de fontes renováveis de energia. Numa escala mundial, os indicativos são de um crescimento acentuado, variando desde 24 GW para 591 GW de potência instalada entre os anos de 2001 a 2018 (GWEC, 2019).

No Brasil, após a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2009 foi realizado o primeiro leilão de comercialização de energia elétrica direcionado exclusivamente para a fonte eólica, resultando na contratação de 1,8GW (ABEeólica, 2019). Nos anos subsequentes foi desencadeada uma trajetória de crescimento da capacidade instalada da energia eólica que atingiu 15,4GW nos últimos 10 anos. (ABEeólica, 2019). A Fig. 1 indica o crescimento da capacidade produtiva das principais montadoras de aerogeradores no Brasil entre 2014 e 2017 (ABDI, 2019).

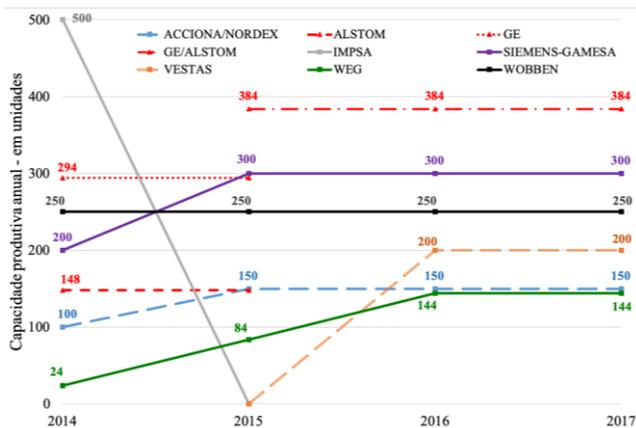


Fig. 1 Evolução da capacidade produtiva de aerogeradores.

No que tange a diversidade de tecnologias empregadas para a construção das unidades aerogeradores, destacam-se arranjos que empregam, predominantemente, geradores de indução duplamente excitado – *doubly fed induction generator* (DFIG), e outros, baseados em geradores síncronos de excitatriz com ímãs permanentes – *permanent magnet synchronous generator* (PMSG). A título de ilustração a Fig. 2 (ANEEL, 2019; The Wind Power, 2019), evidencia percentuais de participação das tecnologias nos parques eólicos presentes no Brasil.

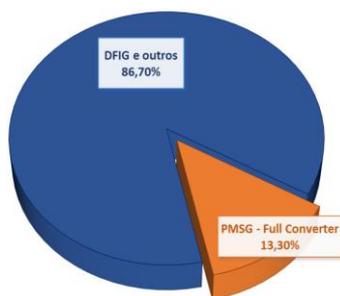


Fig. 2 Participação das tecnologias de aerogeradores utilizados no Brasil

Como indicado, na atualidade, a proporção dos aerogeradores PMSG utilizados no país é minoritária, quando comparada com a parcela de DFIG's. Todavia, vale lembrar que o percentual de 13,3% implica em montantes de potência da ordem de 2 GW presentes nas instalações nacionais, motivo pelo qual tais parques e os horizontes que se abrem para a utilização dos PMSG se apresentam como motivações para estudos destas configurações, como contemplado neste artigo.

Não obstante a filosofia construtiva, ambas tecnologias utilizam conversores de frequência empregado modernas técnicas de chaveamentos e controle. Diante pois da inserção de expressivos níveis de sistemas eletrônicos de conversão, haverá, por conseguinte, reconhecidos impactados sobre as distorções harmônicas produzidas e injetadas nas redes elétricas junto às quais os parques são conectados (Rashid, 2001; Arrillaga and Watson, 2004).

Um aspecto inicial e meritório de destaque refere-se ao fato que os conversores utilizados para a tecnologia DFIG apresentam-se com potências em níveis parciais à potência ativa gerada, enquanto que para o caso dos aerogeradores PMSG, também conhecidos como “*full converter*”, a potência a ser convertida eletronicamente é total (Teodorescu, Liserre and Rodriguez, 2011).

Para o controle das chaves semicondutoras dos inversores, *Voltage Source Inverter* (VSI), tipicamente utiliza-se duas técnicas de modulação por largura de pulso (PWM): *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) e *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM). Essas técnicas apresentam padrões característicos de distorções harmônicas, as quais são designadas por harmônicos esperados ou característicos. Todavia, sob condições não ideais de operação, tanto no que se refere aos equipamentos eletrônicos, quer no que tange a rede elétrica de conexão, outras ordens poderão ocorrer, as quais são denominadas por harmônicos não-característicos (Rashid, 2001).

Quanto a origem das componentes harmônicas por parte dos equipamentos empregados nas instalações de geração aqui referidas, estas são impactadas por fatores de influência explorados em diversos trabalhos. Dentre algumas destas características que determinam os espectros de harmônicos característicos e não característicos, além da tradicional estratégia PWM supra referida, tem-se ainda: o “tempo morto” entre as comutações das chaves; a existência de pré-distorções e/ou desequilíbrios nas redes de conexão; a operação em região de saturação do controle do VSI, etc. Assim esses fatores, de modo individual ou conjunto, podem impactar na qualidade da energia elétrica (QEE) implicando em medidas corretivas (Reis and Oliveira, 2016; Júnior, Gregory and Santos, 2019).

Assim sendo, no Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) determina aos agentes que desejam acessar a rede básica, um relatório técnico de desempenho dos indicadores de qualidade da energia elétrica ainda num estágio primário a autorização da operação da instalação. Vale lembrar que os estudos contemplam várias outras grandezas associadas com a operação, sendo que neste trabalho o foco está dirigido para um indicador pontual. Também, é relevante destacar que, somado aos estudos pré-operatórios, o ONS também determina a realização de estudos após a entrada em operação. Nesta etapa podem ser encontradas diferenças marcantes entre o banco de dados das injeções de harmônicos fornecidos pelos fabricantes e aqueles obtidos via medições direta em campo (ONS, 2016). Por fim, vale salientar que tais estudos estão relacionados com situações operacionais em regime de longa duração e, eventuais situações anômalas na rede, que podem momentaneamente resultar em expressivas alterações das condições pré-estabelecidas para os estudos de acesso, podem, sob tais circunstâncias, impactarem de forma marcante nos espectros harmônicos produzidos. Sob tais condições podem ocorrer substanciais variações das componentes harmônicas características, e ainda, o surgimento de outras, já denominadas por não características ou não esperadas. Nestas situações, mesmo que durante pequenos intervalos de tempo, fenômenos associados, por exemplo, com ressonâncias e seus efeitos podem implicar em efeitos danosos ao sistema e seus componentes.

No cenário supra posto, o presente artigo se encontra imbuído do propósito de analisar a correlação dentre as componentes harmônicas produzidas por uma instalação constituída por um aerogerador PMSG utilizando a técnica de chaveamento SPWM, frente a distorção harmônica produzida quando da ocorrência de variações de tensão de curta duração (VTCD) no sistema elétrico no qual está conectado. É importante destacar

que, mesmo que tais arranjos se apresentem minoritários nas instalações comerciais, o fato que as configurações à base de geradores síncronos fazem uso de processos de conversão plenos (100%) da potência produzida, foram motivadores para os estudos aqui propostos.

2. ESTRUTURA DO AEROGERADOR SÍNCRONO E CARACTERIZAÇÃO DAS VTCDs

A Fig.3 ilustra a estrutura física de um aerogerador PMSG do tipo *full converter*.

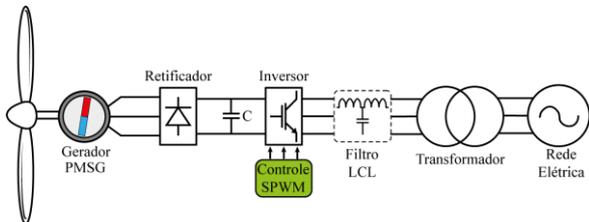


Fig. 3 Topologia do aerogerador PMSG

Os referidos aerogeradores são conectados diretamente ao eixo da turbina e não fazem o uso de caixa de engrenagem para adequar a velocidade de rotação das pás com a faixa velocidade de operação do gerador, assim são classificados como aerogeradores de velocidade variável. Dessa forma, são capazes de atenuar os picos de potência e torque durante uma rajada, uma vez que utilizam a força do vento para aumentar velocidade das pás e armazenar a energia na forma cinética (Hernández, Telsnig and Pradas, 2017).

Como a velocidade dos ventos varia constantemente de acordo com as condições climáticas e as estações do ano, acrescido da ausência de um controle mecânico preciso da rotação da turbina, a frequência da tensão produzida também varia, impossibilitando a conexão com a rede. Assim, a aplicação dos conversores eletrônicos é essencial para promover a interligação.

Isto posto, vale destacar que as distorções harmônicas produzidas pelo inversor VSI com controle SPWM apresenta um padrão característico (Wu, 2006). Quando o conversor opera sob condições em que o índice de modulação de amplitude (ma) está entre os limites de $0 \leq ma \leq 1$, e o índice de modulação de frequência (mf), consiste em um número inteiro, ou seja, operação por modulação simétrica e na região linear, a geração de distorções harmônicas na tensão pode ser definida por (1) (Acha *et al.*, 2002). A Fig.4 ilustra um espectro harmônico da tensão de saída típico dos conversores VSI-SPWM.

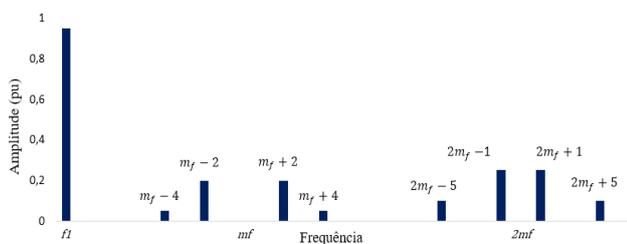


Fig. 4 Espectro harmônico típico da tensão de saída de um inversor SPWM

$$h = lm_f \pm k \quad (1)$$

Em que: h é a ordem harmônica, $l = 1, 3, 5, \dots$ para $k = 2, 4, 8, 10, 14, \dots$ e $l = 2, 4, 6$ para $k = 1, 5, 7$ de modo que k não é

múltiplo de 3, consequentemente, h também não será múltiplo de 3.

Assim, considerando que a frequência de chaveamento do inversor está entre 2kHz a 20kHz e que as componentes harmônicas produzidas, estão posicionadas nas suas mediações, utiliza-se tipicamente um filtro de alta frequência na saída do conversor. Nesse caso, normalmente emprega-se os filtros com topologia Indutor-Capacitor-Indutor (LCL), para mitigar os harmônicos de alta frequência. (Brantsæter *et al.*, 2015)

No entanto, por mais que tipicamente as distorções harmônicas de tensão produzidas pelo inversor em condições ideais, sejam predominantemente de alta frequência, há também a geração de outras componentes de baixa frequência, porém com amplitudes inferiores a 1% da fundamental.

Evidenciando o fenômeno perturbador estudado nesse trabalho, é sabido que os eventos designados por VTCD, são de natureza aleatória, e estão relacionados ao desvio expressivo do valor da tensão eficaz e da duração da ocorrência. As principais causas desse fenômeno são, curtos-circuitos, partida de motores de indução de elevada potência, acionamento de dispositivos de proteção, etc. Dessa forma, o ONS por meio do documento de Procedimento de Rede – submódulo 2.8, classifica um evento tipo VTCD de acordo com a amplitude e duração do evento, levando em consideração a tensão fase-neutro no barramento em questão. Tal categorização é fornecida na Tabela 1. (ONS, 2011)

Tabela 1. Tipos de variações de tensão de curta duração

| Classificação | Duração (d) | Amplitude (Amp) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Momentâneo | | |
| Interrupção (IMT) | $d \leq 3s$ | $Amp < 0,1pu$ |
| Afundamento (AMT) | $1 \text{ ciclo} \leq d$ | $0,1 < Amp \leq 0,9 pu$ |
| Elevação (EMT) | $\leq 3s$ | $Amp > 1,1pu$ |
| Temporário | | |
| Interrupção (ITT) | $3s < d \leq 1 \text{ min}$ | $Amp < 0,1pu$ |
| Afundamento (ATT) | | $0,1 < Amp \leq 0,9 pu$ |
| Elevação (ETT) | | $Amp > 1,1pu$ |

Complementarmente, há ainda uma classificação dos fenômenos na forma de 4 tipos básicos de ocorrência. Esta é indicada na Fig.5. (Bollen, 2000)

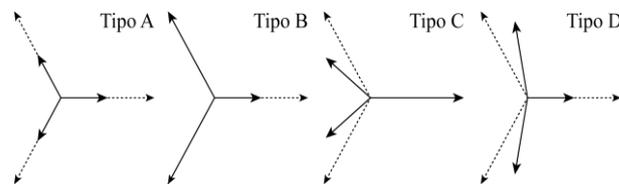


Fig. 5 Tipos de VTCD

As VTCD do Tipo A referem-se aos curtos-circuitos trifásicos equilibrados, em que a redução de tensão ocorre de maneira equivalente nas três fases. Os demais tipos B, C e D são provenientes de faltas assimétricas, ou seja, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra.

3. PARAMETRIZAÇÃO DO ARRANJO UTILIZADOS PARA OS ESTUDOS COMPUTACIONAIS

O arranjo utilizado se apresenta com uma constituição bastante simples, porém, o suficiente para enfatizar a relevância do tema tratado neste artigo. A Fig.6 ilustra o sistema em pauta.

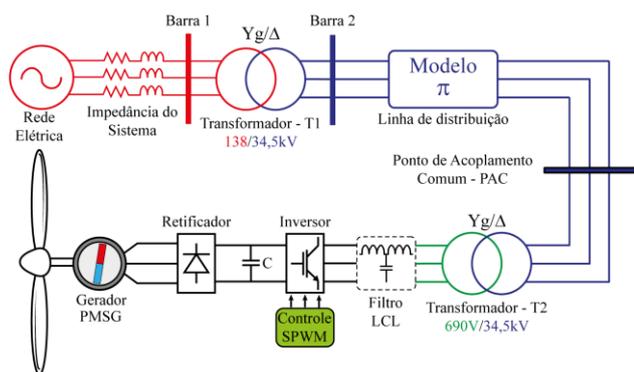


Fig. 6 Sistema elétrico implementado no Matlab/Simulink®

Os parâmetros para modelagem dos componentes encontram-se nas Tabelas 2 a 5.

Tabela 2. Parâmetros do sistema supridor

| Potência de Curto-circuito (MVA) | Tensão Nominal (kV) | Frequência (Hz) |
|----------------------------------|---------------------|-----------------|
| 2500 | 138 | 60 |

Tabela 3. Parâmetros do aerogerador

| Aerogerador PMSG | Potência Nominal (kVA) | Tensão Nominal (V) | Frequência Nominal (Hz) | Velocidade do vento (m/s) |
|------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|
| | 680 | 690 | 60 | 11 |

Tabela 4. Parâmetros dos transformadores

| Trafo | Potência Nominal (MVA) | Tensão 1° (kV) | Tensão 2° (kV) | R (%) | X (%) | Conexão |
|-------|------------------------|----------------|----------------|-------|-------|---------|
| T1 | 47 | 138 | 34,5 | 0,27 | 8,00 | Yt - Δ |
| T2 | 0,7 | 34,5 | 0,69 | 0,50 | 4,00 | Yt - Δ |

Tabela 5. Parâmetros da linha de distribuição

| Linha 30km | Resistência (Ω/km) | | Indutância (mH/km) | | Capacitância (nF/km) | |
|------------|--------------------|-------|--------------------|------|----------------------|-------|
| | R0 | R1 | L0 | L1 | C0 | C1 |
| LD | 0,413 | 0,115 | 3,32 | 1,05 | 5,01 | 11,33 |

4. ESTUDO DE CASO

Os estudos realizados compreenderam 5 situações, as quais estão associadas com a operação do aerogerador PMSG, durante a ocorrência das VTCDs explicitadas, as quais permaneceram por 1s:

- I. Condições normais de operação da rede;
- II. Ocorrência de VTCD do Tipo A;
- III. Ocorrência de VTCD do Tipo B;
- IV. Ocorrência de VTCD do Tipo C;
- V. Ocorrência de VTCD do Tipo D.

Vale ressaltar que as componentes harmônicas produzidas pelo aerogerador não apresentam amplitudes constantes ao longo do tempo, fato que justifica o emprego de metodologias de agregação de medição como a proposta pelo ONS, para sua análise (ONS, 2011). No entanto, como deseja-se realizar um estudo durante um evento momentâneo (VTCD) e avaliar seus efeitos na distorção harmônica produzida pelo aerogerador, avaliar-se-á o valor máximo de cada componente harmônica, ao invés de valores agregados. Isto se justifica pela possibilidade de ocorrência de ressonâncias no sistema elétrico, que somado a uma variação de magnitude das componentes harmônicas de corrente geradas pelo aerogerador

durante o período do evento podem causar estresses térmicos e dielétricos nos equipamentos conectados a esse circuito, bem como ao próprio aerogerador. Estas variações momentâneas no valor das componentes harmônicas de corrente não são visualizadas pelos analisadores de qualidade da energia, dado que isto é expurgado pelo critério de agregação.

É importante destacar, também, que os valores percentuais de corrente apresentados nos gráficos que se seguem, são expressas na proporção da corrente nominal do transformador T2, apresentado na Fig. 6, tomando como referência o lado de alta tensão.

4.1 Condições normais de operação da rede

Como informado, os resultados aqui apresentados encontram-se associados com o aerogerador operando em sua potência plena, para a qual o vento incidente é de 11 m/s e a rede elétrica com tensão nominal e equilibrada. A Fig. 7 mostra o espectro harmônico das três correntes de linha injetadas no PAC.

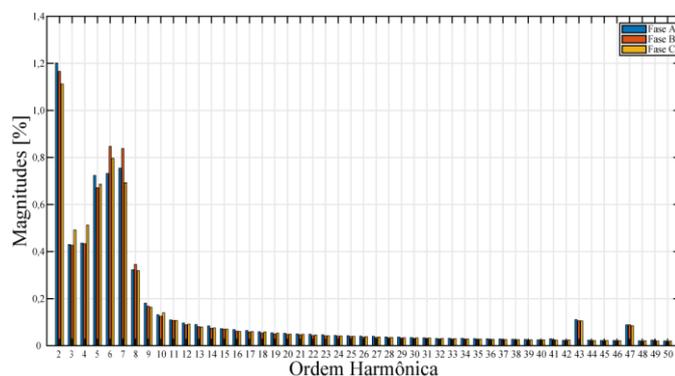


Fig. 7 Espectro harmônicos das correntes de linha injetadas no PAC

De acordo com a Fig.7, é possível perceber que as amplitudes das componentes harmônicas de baixa frequência são superiores às demais, mesmo com a rede em condições ideais. Sendo assim, como referido anteriormente essas componentes de baixa ordem, são as mais prejudiciais ao sistema e por isso serão evidenciadas nas análises dos casos subsequentes.

4.2 VTCD do Tipo A

A magnitude da VTCD do Tipo A aplicada ao sistema foi de 0,6pu nas três fases. O espectro harmônico das correntes está apresentado na Fig.8.

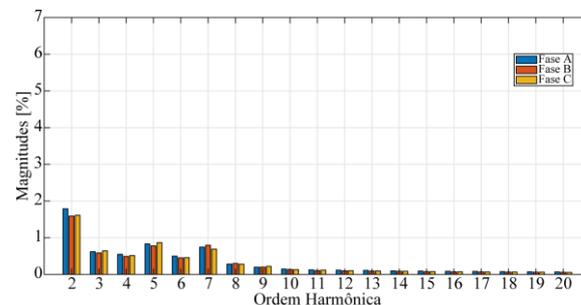


Fig. 8 Espectro harmônico das correntes harmônicas injetadas no PAC durante uma VTCD Tipo A

Para esse caso houve a predominância das componentes de 2ª, 5ª e 7ª ordem, atingindo valores de 1,8%, 0,87% e 0,79%, respectivamente. Maiores discussões sobre as alterações observadas serão feitas na seção subsequente a presente.

4.3 VTCD do Tipo B

Ao aplicar uma VTCD do tipo B no sistema, a tensão da fase A atingiu 0,6pu e as tensões das fases B e C permaneceram com magnitude igual a 1,0pu. O espectro harmônico das correntes está apresentado na Fig.9. Para este caso, embora maiores considerações são contempladas na seção seguinte, é importante destacar que a 3ª ordem atingiu magnitude máxima de 4,51%, portanto cerca de 10 vezes superior aquela do caso 4.1.

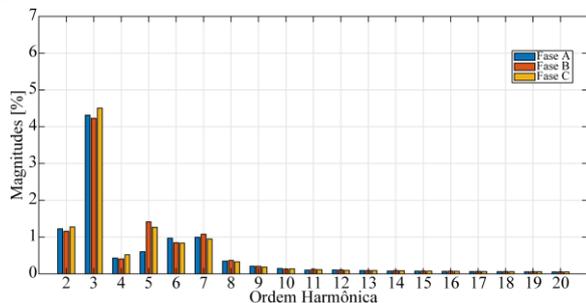


Fig. 9 Espectro harmônico das correntes harmônicas injetadas no PAC durante uma VTCD Tipo B

4.4 VTCD do Tipo C

Para a representação de uma VTCD do Tipo C foram empregadas tensões impostas na fase A de 1,0pu e 0,6pu para as fases B e C. O espectro harmônico das correntes é ilustrado na Fig.10.

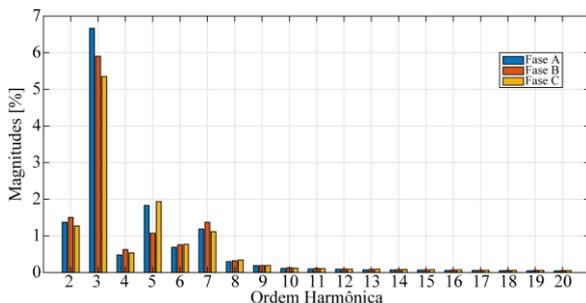


Fig. 10 Espectro harmônico das correntes de linha injetadas no PAC durante a VTCD Tipo C

Novamente, com a incidência de uma falta assimétrica houve uma predominância significativa da componente harmônica de 3ª ordem, atingindo valores superiores a 5,3%.

4.5 VTCD do Tipo D

Por fim, uma VTCD do Tipo D foi imposta através de uma tensão de 0,6pu na fase A e 0,8pu para as fases B e C no PAC. O espectro harmônico das correntes de linha encontra-se apresentado na Fig.11.

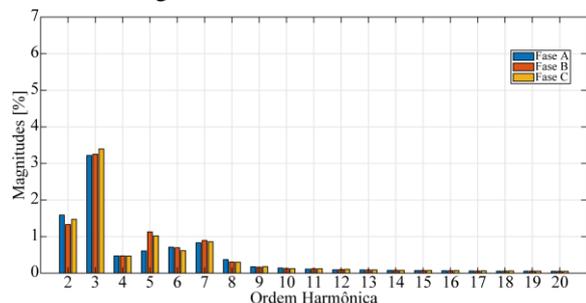


Fig. 11 Espectro harmônico das correntes harmônicas injetadas no PAC durante uma VTCD Tipo D

Em decorrência desse evento, as componentes harmônicas de 2ª, 3ª, 5ª e 7ª ordem alcançaram amplitudes máximas de 1,59%, 3,40%, 1,13% e 0,90% respectivamente.

5. ANALISE DOS RESULTADOS

Nesta seção é feita uma análise através de uma síntese comparativa entre os resultados obtidos anteriormente nas simulações dos quatro tipos de VTCD. A base para as discussões está na correlação dos resultados encontrados para cada situação sob VTCD com aqueles obtidos para a situação ideal para a rede de conexão. Destaque é dado para as componentes harmônicas que evidenciaram as maiores amplitudes.

Para o caso associado com uma VTCD do Tipo A, foi possível perceber que não ocorreram mudanças significativas no que diz respeito ao espectro harmônico, como ilustra a Fig.12. Isto, pode ser justificado pelo fato de que o evento perturbador é equilibrado, ou seja, houve a mesma redução de tensão nas três fases. Há alterações nas magnitudes, porém em proporções não extremas.

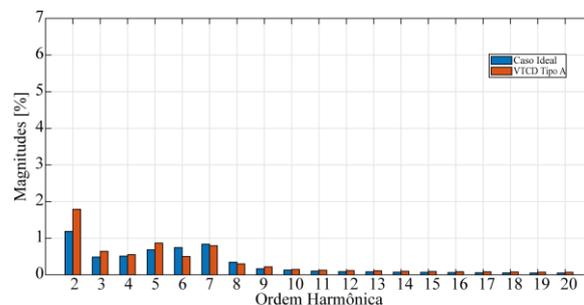


Fig. 12 Comparação entre as magnitudes das componentes harmônicas: caso ideal versus VTCD Tipo A

Já no caso em que se aplicou uma falta monofásica ao sistema (VTCD do tipo B), o fato deste fenômeno ocasionar um expressivo desequilíbrio nas tensões CA, constata-se um crescimento acentuado da componente de 3ª ordem, como mostrado na Fig.13. As demais componentes harmônicas múltiplas inteiras da terceira, não seguiram o mesmo comportamento.

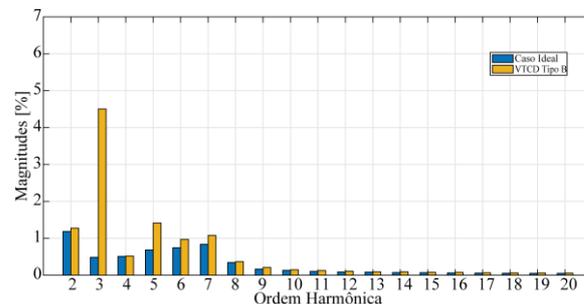


Fig. 13 Comparação entre as magnitudes das componentes harmônicas: caso ideal versus VTCD Tipo B

Os efeitos provenientes da VTCD do tipo C, impactaram num grande aumento para a componente de 3ª ordem, que passou de 0,49% para 6,66%, além disso, realça-se o crescimento das componentes de 5ª e 7ª ordem, como apresentado na Fig.14.

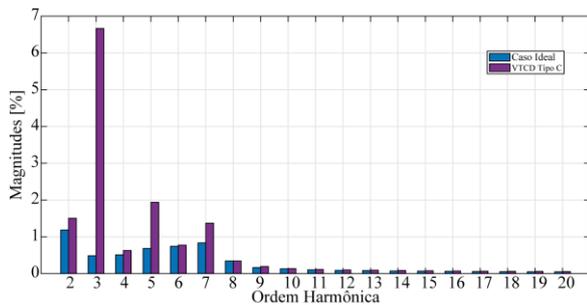


Fig. 14 Comparação entre as magnitudes das componentes harmônicas: caso ideal versus VTCD Tipo C

Para o caso da VTCD do tipo D constata-se, como para outras situações, um grande aumento da componente harmônica de 3ª ordem, sem que houvesse maiores alterações para as demais componentes. A Fig.15 sintetiza este comportamento.

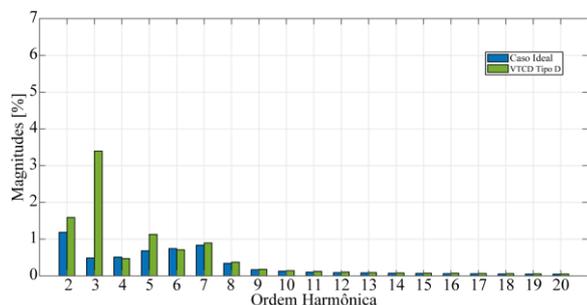


Fig. 15 Comparação entre as magnitudes das componentes harmônicas: caso ideal versus VTCD Tipo D

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho se apresentou com o objetivo central de investigar o comportamento das gerações harmônicas de corrente produzidas pelo conversor VSI com técnica de chaveamento SPWM presente no aerogerador PMSG. A ideia principal foi de correlacionar as correntes injetadas por tais instalações no ponto de acoplamento com a rede concessionária local, quando de alterações operacionais impostas pela manifestação de VTCDs na rede CA.

Uma vez modelado o arranjo típico selecionado no software Matlab/Simulink®, estudos sob condições normais e também sob a ação de variações de tensão de curta duração foram realizados para situações típicas de ocorrência em campo. Os resultados assim obtidos indicaram que, sob o ponto de vista da geração de harmônicos, ocorrem expressivas variações das grandezas esperadas sob condições normais de funcionamento e aquelas vinculadas com a operação dos aerogeradores quando da ocorrência de distúrbios, como os aqui analisados. Portanto, mesmo que os estudos de acesso pré-operatórios e pós-operatórios dos complexos eólicos não indiquem maiores problemas com as distorções harmônicas junto ao barramento de conexão com o sistema nacional integrado, diante das situações anômalas exploradas, fica evidenciada a possibilidade de expressivas variações destas condições de funcionamento. E assim sendo, ressonância em proporções não previstas podem, efetivamente, ocorrer nas instalações ora tratadas e, caso tenham sido previstas tais situações, medidas mitigadoras poderiam evitar danos físicos ou operacionais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ABDI (2019) *Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil*.
- ABEeólica (2019) *Associação Brasileira de Energia Eólica*. Available at: <http://abeeolica.org.br> (Accessed: 15 December 2019).
- Acha, E. *et al.* (2002) *Power Electronic Control in Electrical Systems*. 1st edn. Newnes.
- ANEEL (2019) *Capacidade de Geração do Brasil, Banco de Informações de Geração - BIG*. Available at: <https://www2.aneel.gov.br> (Accessed: 15 December 2019).
- Arrillaga, J. and Watson, N. R. (2004) *Power System Harmonics*. 2nd edn. John Wiley & Sons Ltd.
- Bollen, M. H. J. (2000) *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. 1st edn. New York: Wiley-IEEE Press.
- Brantsæter, H. *et al.* (2015) *Passive filter design and offshore wind turbine modelling for system level harmonic studies*, *Energy Procedia*.
- EPE (2019) *Expansão da Geração*. Available at: <http://www.epe.gov.br> (Accessed: 15 December 2019).
- GWEC (2019) *Global Wind Report 2018*.
- Hernández, C. V., Telsnig, T. and Pradas, A. V. (2017) *Wind Energy Status Report*.
- Júnior, C. R. de A., Gregory, R. C. F. and Santos, I. N. (2019) *Analysis of Non-Characteristic Harmonics from the Pulse Width Modulation Techniques in DFIG Wind Turbines*. São Paulo.
- ONS (2011) 'Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes', November.
- ONS (2016) 'Procedimentos de Rede, Submódulo 3.3 - Solicitação de Acesso', December.
- Rashid, M. H. (2001) *Power Electronics Handbook*. 1st edn. Academic Press.
- Reis, A. and Oliveira, J. C. de (2016) 'Physical Concepts Related to Harmonics Produced by Wind Turbines Operation', *IEEE Latin America Transactions*.
- Teodorescu, R., Liserre, M. and Rodriguez, P. (2011) *GRID CONVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER SYSTEMS*. 1st edn. John Wiley & Sons Ltd.
- The Wind Power (2019) *The Wind Power - Wind Energy Market Intelligence*. Available at: <https://www.thewindpower.net> (Accessed: 15 December 2019).
- Wu, B. (2006) *High-Power Converters and AC Drives*. 1st edn. John Wiley & Sons Ltd.